

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.06.013

空间相关非平稳地震动反应谱拟合

刘志明^{1,2} 杜成斌^{1,2} 孙立国¹

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要:为了给大跨度结构的抗震分析提供空间多点相关地震动加速度时程,在前人研究的基础上,提出根据标准设计反应谱合成非平稳空间相关多点地震波的方法.从规范反应谱出发得到功率谱,然后由地震动的空间相关性得到功率谱矩阵,用三角级数法生成各点地震动.生成的地震波具有地震动的空间相关性,同时还考虑了强度和频率的双重非平稳性,在保证相关性的前提下对初始波进行修正使其反应谱与规范反应谱逼近.数值算例表明,利用该方法生成的地震动加速度反应谱具有较高的拟合精度,合成的多点时程可用于大坝等延伸结构多点激励的地震动输入.

关键词:反应谱;人造地震动;空间相关性;非平稳;多点输入

中图分类号: P315.9; TU311.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)06-0675-05

地震是人类遭受的最主要的自然灾害之一,从 20 世纪初开始人们就在结构设计中考虑地震的影响,到 20 世纪中期各国规范大都要求采用反应谱法设计抗震结构.随着结构抗震研究水平的不断提高,结构抗震分析的反应谱法已无法满足实际需求,对于重要的大型复杂结构(如核电站、桥梁、水坝和超高层建筑等)的抗震设计,都在规范中规定要用加速度时程分析法分析建筑物的地震响应,这就需要选择满足一定地震环境及场地条件的加速度时程作为结构动力分析的输入.由于强震记录有限,不能满足多方面的要求,所以人造加速度时程成为一种合理的解决办法.

许多研究者对人造地震动做过研究^[1-3],得到很多有价值的成果,生成的地震动也广泛地应用于实际工程的抗震分析中,这些研究加深了人们对人造地震动的认识.由于大型复杂结构受地震动空间变化的影响强烈,对这些结构要求进行多点输入抗震分析,但是上述方法生成的加速度时程只适合于均匀输入的时程分析,而空间相关地震动能综合反映地震动的空间变化特性,适用于这些大尺度结构地震反应分析,所以空间相关地震动的合成对于大跨复杂结构的抗震分析至关重要.现有的合成多点地震动方法,一般都是从功率谱出发合成多点地震动时程,但是在进行结构抗震设计分析时,荷载经常是以反应谱来表示的,规范反应谱成为衡量荷载大小的一个标准,在抗震设计中通常要得到与反应谱拟合的加速度时程,为此本文提出了一种从规范反应谱出发合成相关多点地震动的方法,该方法具有较高的拟合精度,合成的地震动可以作为大跨度结构多点激励的地震动输入.

1 地震动的空间相关性

在一次地震过程中,同一场地上空间不同点处接收的地震波并非相互独立,而是具有一定的空间相关性.地震时从震源释放出来的能量以地震波的形式传至地表,而地表各点接收到的地震波是经由不同的路径、不同的地形地质条件而到达的,因而各点地表的震动必然存在差别,为了反映这些空间的相关性,可以用相干函数来描述这一特性.

Kiureghian^[4]从理论上对地震动相干函数进行了分析,认为影响地震动空间相关性的 4 个主要因素是:不相干效应、行波效应、局部场地效应和波的衰减效应.

收稿日期:2008-12-18

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007CB714104);江苏省研究生培养创新工程项目(CX08B_104Z);中国水利水电科学研究院开放基金(2008538613)

作者简介:刘志明(1982—),男,江西瑞金人,博士研究生,主要从事水工结构抗震分析研究.

地震动的相关性可以用式(1)来描述^[5]:

$$\gamma(d, \omega) = \exp(-a(\omega)d^b) \exp(-i\omega d/v_a) \tag{1}$$

其中 $a(\omega) = a_1\omega^2 + a_2$ $b(\omega) = b_1\omega^2 + b_2$

式中: ω ——地震动频率; d ——传播方向上测点间的投影距离; v_a ——地震波的视波速,视波速是研究地震波行波效应的一个重要参数,在实际应用中可以取为常数.具体参数取值可见文献[6].式(1)右边的第一项表示不相干效应,第二项表示行波效应,局部场地的效应由不同测点的功率谱密度函数来描述.

2 地震动的合成

2.1 地震动的合成公式

空间相关地震动时程的合成方法很多,Hao等^[7]利用三角级数和的形式合成第1点的地震动时程,在生成第2点的时程时,考虑与前面已经生成的第1点地震动的相关性,依此类推生成 n 点的时程时,考虑与前面 $n-1$ 点地震动的相关性.屈铁军等^[6,8]在该方法基础上进行改进,生成每点地震动时程时,都考虑与其余 $n-1$ 点地震动的相关性,但是生成的地震动时程局部场地收敛性较差,董汝博等^[9]对屈铁军的模型进行修正,得到合成空间相关非平稳地震动时程的公式:

$$\begin{cases} u_1(t) = \sum_{m=1}^n \sum_{k=0}^{N-1} a_{1m}(\omega_k) \cos[\omega_k t + \theta_{1m}(\omega_k) + \varphi_k] \\ u_2(t) = \sum_{m=1}^n \sum_{k=0}^{N-1} a_{2m}(\omega_k) \cos[\omega_k t + \theta_{2m}(\omega_k) + \varphi_k] \\ u_n(t) = \sum_{m=1}^n \sum_{k=0}^{N-1} a_{nm}(\omega_k) \cos[\omega_k t + \theta_{nm}(\omega_k) + \varphi_k] \end{cases} \tag{2}$$

式中: $a_{nm}(\omega_k), \theta_{nm}(\omega_k)$ ——考虑第 n 点和第 m 点相关的第 k 个频率分量的幅值和相位角,它们都是确定的量,取值要满足第 n 点与第 m 点的相关性和相位特性,与功率谱矩阵有关; φ_k ——第1点的初始相位角,满足相位差谱的统计规律,当 $k \neq s$ 时, φ_k 和 φ_s 相互独立.

2.2 功率谱矩阵及其分解

对于空间相关的各点,它们的功率谱具有一定的相关性,两点之间的互功率谱为

$$S_{jm}(i\omega) = \sqrt{S_j(i\omega)S_m(i\omega)}\gamma(\omega, d) \tag{3}$$

式中: $S_j(i\omega), S_m(i\omega)$ —— j, m 两点的自功率谱; $\gamma(\omega, d)$ ——两点间的相干函数.对于频率分量为 ω_k 的地震动,其功率谱的互谱矩阵 $S(i\omega_k)$ 是 Hermite 矩阵,且是正定矩阵.根据矩阵理论,功率谱矩阵可进行 Cholesky 分解,即分解为下三角矩阵和上三角矩阵的乘积:

$$S(i\omega_k) = L(i\omega_k)L^H(i\omega_k) \tag{5}$$

式(2)中 $a_{nm}(\omega_k)$ 和 $\theta_{nm}(\omega_k)$ 可以根据式(6)求得:

$$a_{nm}(\omega_k) = \sqrt{4\Delta\omega} |l_{nm}(i\omega_k)| \quad \theta_{nm}(\omega_k) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[l_{nm}(i\omega_k)]}{\text{Re}[l_{nm}(i\omega_k)]} \tag{6}$$

式中 $\Delta\omega$ 为频率采样间隔.

在实际工程应用中,各点之间的自功率谱密度函数相差不是很大,通常假设各点的加速度功率谱密度函数相同.各点的自功率谱密度函数可以利用 Kaul^[10]提出的反应谱和功率谱的近似关系求得

$$S(\omega_k) = \frac{\zeta^2 S_a^T(\omega_k)^2}{\pi\omega_k \ln[-\pi \ln(1-P)\gamma(\omega_k t_d)]} \tag{7}$$

式中: $S_a^T(\omega_k)$ ——给定的目标加速度反应谱; ζ ——阻尼比; P ——反应超过反应谱值的概率,通常 $P \leq 15\%$; t_d ——地震动的总持续时间.

2.3 地震动的非平稳性

实际地震动具有非平稳特性,它的非平稳性表现在2个方面,一是强度非平稳,地震动的强度存在明显的非平稳性,地震强度开始的时候较小,随后逐渐加强进入相对平稳阶段,最后渐渐衰减;二是频率非平稳性,在不同时段地震动具有不同的频率成分,各频率分量的衰减速度也不同.

对于地震动时程的强度非平稳特性,可以用包络函数乘以加速度时程来体现.包络函数是基于地震记录由上升、持续平稳和下降这 3 个阶段的特性得到的,采用如下广泛应用的包络函数形式^[11]:

$$f(t)=\begin{cases} (t/t_1)^c & t < t_1 \\ 1 & t_1 \leq t < t_2 \\ \exp[-c(t-t_2)] & t_2 < t \end{cases} \tag{8}$$

在式(8)中 c 控制下降段衰减强度的快慢, t_1 、 t_2 分别控制平稳段的首、末时刻,这些参数决定了 $f(t)$ 的形状,也即决定着合成地震波的形状,恰当地对这些参数取值,可使生成的人工波波形在一定程度上更接近真实地震记录波形.

对于地震动时程频率非平稳特性,可以用地震动的相位差谱来反映.朱昱等^[12]通过计算大量的实际地震数据,研究了相位差谱的分布特征,指出相位差谱不具明显的对称性,符合对数正态分布,并统计分析了其不同震级、震中距条件下相位差谱对数正态分布的均值和标准差,还给出了分布曲线的解析式.用相位差谱对数正态分布的均值、标准差和分布曲线的解析式,得到对数正态分布的相位差谱,则在给定初始相角 φ_0 (如 $\varphi_0=0$) 之后,就可以根据 $\varphi_{k+1}=\varphi_k+\Delta\varphi_k$ 产生一系列相角 $\varphi_k(k=0,1,2,\dots,\frac{n}{2}-1)$.

2.4 初始波的修正

将式(2)计算得到的加速度时程乘以包络函数,可以得到强度和频率均非平稳的地震动时程 $a^*(t)$,但是用式(2)的合成方法生成的某点的地震动,它的反应谱和目标反应谱可能会有一定的差距,可能不满足精度的要求.为了使生成各点的加速度反应谱与目标反应谱一致,要对生成的地震动进行修正,但必须以保证不改变各点地震动的相关性、相位关系及随机性为前提^[13].

设生成的第 j 点的加速度时程为 $a_j^*(t)$,在频率为 ω_k 时相应的计算反应谱为 $S_a(\omega_k)$,目标反应谱为 $S_a^T(\omega_k)$,当反应谱的相对误差

$$E(\omega_k)=\left|\frac{S_a(\omega_k)-S_a^T(\omega_k)}{S_a^T(\omega_k)}\right|\geq \epsilon \tag{9}$$

时,对频率分量 ω_k 处的幅值进行调整. ϵ 为给定的精度要求,一般要求 $\epsilon=0.05$. 调整系数

$$R(\omega_k)=S_a^T(\omega_k)/S_a(\omega_k) \tag{10}$$

设 $a_{nm}^*(\omega_k)$ 为调整前的幅值, $a_{nm}(\omega_k)$ 为调整后的幅值,则有

$$a_{nm}(\omega_k)=R(\omega_k)a_{nm}^*(\omega_k) \tag{11}$$

经式(11)修正幅值后生成人工地震波,并重复上面的精度检验直到满足精度要求为止.在修正过程中,只改变了生成地震动时各个频率分量的幅值,反映各点相位关系的 $\theta_{nm}(\omega_k)$ 和反映相位差谱的随机相角 φ_k 并不发生变化,所以各点地震动的空间相关性也不会发生改变.

3 数值算例

大坝作为一种空间延伸结构,对大坝进行抗震分析时,有必要采用非均匀输入的方式.本文以金安桥水电站为例合成了空间多点地震动时程.金安桥水电站位于云南省丽江地区境内的金沙江中游河段上,是金沙江中游河段规划“一库八级”中的第五级电站,工程的开发任务以发电为主,兼顾旅游、库内航运、水产养殖和保持水土等综合利用.坝址位于扬子准地台西部边缘的丽江台缘褶皱带内,地处青藏高原东南侧滇西北新构造运动强烈活动部位,这一地区工程地质环境条件复杂,河谷深切,岸坡陡峻,地表动力地质作用强烈.根据国家地震局地质研究所对场地地震安全性评价成果,坝址区设防烈度为 9 度,设计水平峰值加速度为 $0.399g$,场地类别为 II 类^[14].本文以 DL5073—2000《水工建筑物抗震设计规范》的设计反应谱作为目标谱^[15],反应谱曲线如图 1 所示,其主要参数:场地特征周期 $T_g=0.2\text{ s}$,反应谱最大值 $\beta_{\max}=2.0$,地面峰值加速度 $a_{\max}=0.4g$,阻尼比为 0.05 .根据 $\beta=S_a^T(T)/a_{\max}$,可以确定目标加速度反应谱 $S_a^T(T)$.

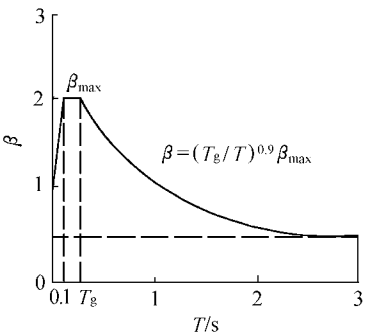


图 1 设计反应谱
Fig. 1 Design response spectra

假设在地震波传播方向有如图 2 所示的 4 个点,它们的间距都是 100 m,1 点所在的位置坐标为 0. 根据前述合成相关多点地震动的方法,合成了拟合目标反应谱的多点人造地震动如图 3 所示,从波形上可以看出相邻 2 点的加速度波形较相似,这是因为它们在波传播方向上的投影距离较小,具有较好的局部收敛性,同时也说明合成的地震动具有空间相关性. 为了检验本文方法的拟合精度,将生成地震波的反应谱和目标反应谱进行对比,如图 4 所示,从图 4 可以看出生成地震波的反应谱和目标谱接近,可以认为具有很高的拟合精度. 本算例给出的是水工建筑设计的反应谱,同理给出其他设计反应谱,利用本文方法同样可以合成空间相关地震动.

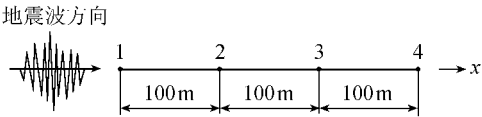


图 2 各点平面位置

Fig. 2 Layout of various stations

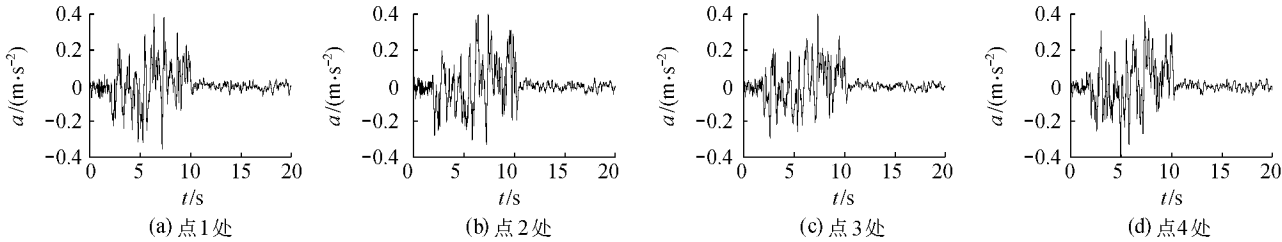


图 3 生成的各点加速度时程

Fig. 3 Generated hydrographs of acceleration at various stations

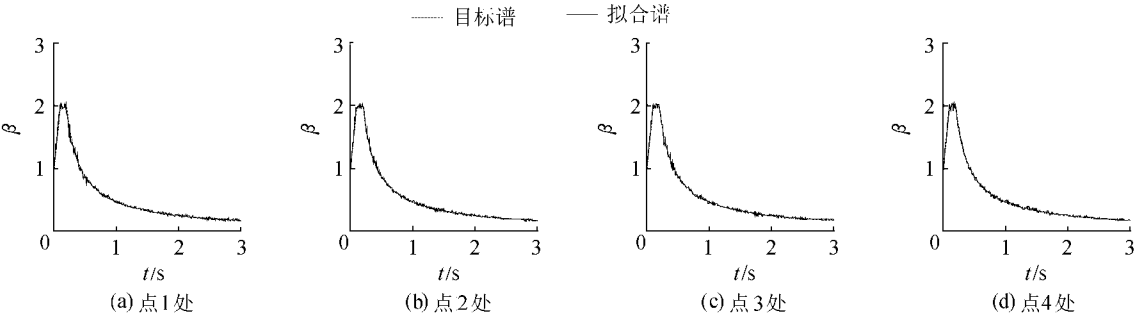


图 4 合成地震波反应谱与目标反应谱拟合结果

Fig. 4 Comparison between response spectra of generated seismic waves and target response spectra

4 结 论

地震动的空间变化对大跨度结构的抗震分析非常重要,也日渐引起工程界的重视. 本文从规范^[15]中的标准设计反应谱出发计算功率谱,对功率谱矩阵进行 Cholesky 分解,得到各频率分量对应的幅值和频率与功率谱矩阵分解值的关系;用服从对数正态分布的相位差谱生成随机相角,反映地震动频谱的非平稳特性;用强度包络函数进行调制,使合成的地震动具有强度非平稳性,在不改变地震动相关性的前提下对地震波进行修正,使反应谱与规范谱拟合良好. 由算例可以看出本文方法原理简单,只要给定目标谱,就可合成与目标谱拟合的空间相关非平稳多点地震动,而且拟合精度较好,生成的人工加速度时程可以用于多点激励的地震动输入.

参考文献:

[1] 胡聿贤,何训.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,1986,6(2):37-51.(HU Yu-xian,HE Xun. Phase angle consideration in generation response spectrum-compatible ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,1986,6(2):37-51.(in Chinese))

[2] 赵光恒,杨伟林.随机地震波的构造及其在重力坝抗震计算中的应用[J].河海大学学报,1992,20(1):38-43.(ZHAO Guang-heng,YANG Wei-lin.Generation of artificial random earthquakes and its application in calculation of dynamic reliability of gravity dams [J].Journal of Hohai University,1992,20(1):38-43.(in Chinese))

[3] 牛志国,李同春,王亚莉.基于水工设计反应谱的人工地震波合成[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(3):262-266.

- (NIU Zhi-guo, LI Tong-chun. Synthesis of simulated earthquake waves based on hydraulic design response spectrum[J]. Journal of Hohai University Natural Sciences, 2007, 35(3): 262-266. (in Chinese))
- [4] Der KIUREGHIAN A. A coherency model for spatial varying ground motion[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25(1): 99-111.
- [5] 屈铁军,王君杰,王前信.空间变化的地震动功率谱的实用模型[J].地震学报,1996,18(1):55-62.(QU Tie-jun, WANG Jun-jie, WANG Qian-xin. Practical spatial variable model of ground motion power spectrum[J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 18(1): 55-62. (in Chinese))
- [6] 屈铁军,王前信.空间相关多点地震动合成(II):合成实例[J].地震工程与工程振动,1998,18(2):25-32.(QU Tie-jun, WANG Qian-xin. Simulation of spatial correlative time histories of multi-point ground motion, part II: application of fundamental formulas[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(2): 25-32. (in Chinese))
- [7] HAO Hong, OLIVEIRA C S, Penzien J. Multiple-station ground motion processing and simulation based on SMART-1 array data[J]. Nuclear Engineering and Design, 1989, 111: 293-310.
- [8] 屈铁军,王前信.空间相关多点地震动合成(I):基本公式[J].地震工程与工程振动,1998,18(1):8-15.(QU Tie-jun, WANG Qian-xin. Simulation of spatial correlative time histories of multi-point ground motion, part I: fundamental formulas[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(1): 8-15. (in Chinese))
- [9] 董汝博,周晶,冯新.非平稳空间相关多点地震动合成方法研究[J].地震工程与工程振动,2007,27(3):10-14.(DONG Ru-bo, ZHOU Jing, FENG Xin. Simulation of non-stationary spatial correlative time histories of multi-point ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(3): 10-14. (in Chinese))
- [10] KAUL M K. Stochastic characterization of earthquake through their spectrum[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1978, 5(5): 497-509.
- [11] 曹国安,张鸿儒.地震动强度包络函数模型[J].北方交通大学学报,1998,22(1):29-33.(CAO Guo-an, ZHANG Hong-ru. Envelope function model of earthquake intensity[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1998, 22(1): 29-33. (in Chinese))
- [12] 朱昱,冯启民.地震加速度相位差谱分布的数字特征[J].地震工程与工程振动,1993,13(2):30-37.(ZHU Yu, FENG Qi-min. Digital characteristics of phase difference spectrum distribution of earthquake acceleration[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1993, 13(2): 30-37. (in Chinese))
- [13] 屈铁军,宋金峰,陈厚群.拱坝自由场地地震动模拟[J].水利学报,1998,29(2):72-78.(QU Tie-jun, SONG Jin-feng, CHEN Hou-qun. Simulation of ground motion on free field of arch dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(2): 72-78. (in Chinese))
- [14] 金安桥水电站可行性研究报告[R].昆明:中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院,2004.
- [15] DL5073—2000,水工建筑物抗震设计规范[S].

Fitting of response spectra for spatially correlated non-stationary ground motion

LIU Zhi-ming^{1,2}, DU Cheng-bin^{1,2}, SUN Li-guo¹

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract : In order to provide spatially correlated multi-station ground motion for the seismic analysis of structures with large spans, a method for the generation of spatially correlated non-stationary multi-station ground motion compatible with the code response spectra is proposed based on previous research. The power spectra were determined using the code response spectra. The matrix of the power spectra was then obtained from the spatial correlation of the ground motion, and the ground motion at various stations was generated using the trigonometric series method. The generated seismic waves were spatially correlated to the ground motion, and considered the double non-stationary properties of strength and frequency. Under the prerequisite of ensuring correlation, the original waves were modified, and their response spectra were made to be closer to the code response spectra. Numerical simulations show that the response spectra of the ground motion generated by the proposed method are of high precision, and the generated multi-station hydrographs of ground motion can be used as the input of ground motion for the analysis of structures such as dams considering the effect of multi-station excitation.

Key words : response spectrum ; artificial ground motion ; spatial correlation ; non-stationary property ; multi-station excitation