

文章编号: 1000-7598 (2011) 02-0387-07

# 沙牌坝址基岩场地地震动输入参数研究

钟菊芳<sup>1</sup>, 温世亿<sup>2</sup>, 胡 晓<sup>3</sup>

(1. 南昌航空大学 土木建筑学院, 南昌 330063; 2. 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038;  
3. 中国水利水电科学研究院 工程抗震研究中心, 北京 100044)

**摘 要:** 重大水利水电工程地震动输入参数必须根据专门的地震危险性分析结果来确定。目前由地震危险性分析得到的一致概率反应谱具有包络的意义, 不能反映实际地震的频谱特性, 输入“一致概率反应谱”可能导致地震作用偏大; 拟合设计反应谱人工生成地震动加速度时程的频率非平稳性也没有得到很好解决。为了解决这些问题, 得到与坝址地震危险性一致、具体地震的输入参数, 结合沙牌大坝提出了一套适用于重大水利水电工程基岩场地地震动输入参数确定方法: 通过以有效峰值加速度为参数的概率地震危险性计算分析, 确定坝址不同超越概率下的有效峰值加速度及对坝址贡献最大的潜在震源区; 在最大贡献潜在震源内利用震级空间联合分布概率最大法确定坝址设定地震, 依据加速度反应谱衰减关系确定与坝址设定地震对应的设计反应谱; 根据设定地震结果和时变功率谱模型参数衰减关系确定时变功率谱, 将时变功率谱和最小相位谱按三角级数叠加法进行强度和频率非平稳地震加速度时程合成。在对沙牌坝址区域的地震活动性及地震构造环境分析评价的基础上, 采用上述方法, 得到了坝址基岩场地不同超越概率下的有效峰值加速度、设计反应谱、强度和频率非平稳地震加速度时程等地震动输入参数。

**关 键 词:** 沙牌坝址; 设定地震; 时变功率谱; 最小相位谱; 地震动输入参数  
**中图分类号:** TU 452 **文献标识码:** A

## Study of ground motion input parameters of Shapai dam rock site

ZHONG Ju-fang<sup>1</sup>, WEN Shi-yi<sup>2</sup>, HU Xiao<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;  
2. Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China;  
3. Earthquake Engineering Research Center, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

**Abstract:** There are many limitations for important hydraulic project's rock site at present, such as envelopment effects of probability-consistent response spectrum, and frequency stationarity in acceleration time history, etc.. In order to overcome those shortcomings, a new method of determination of ground motion input parameters for important hydraulic project's rock site has been put forward in this study. The effective peak acceleration with different exceeding probability, as well as the dominant potential seismic source which had the largest contribution to the site, have been determined by using probabilistic seismic hazard analysis, which based on effective peak acceleration. The magnitude of scenario earthquake within the dominant potential earthquake sources is determined by the largest probability of magnitude-spatial joint distribution, and the corresponding design response spectra is determined by the attenuation relationship of acceleration response spectra. Then evolutionary power spectrum is gained according to scenario earthquake and the attenuation relationships of evolutionary power spectrum model parameters, and the amplitude and frequency non-stationary acceleration time history at dam site are synthesized by using trigonometric series superposition method, which based on evolutionary power spectra and minimum phase spectrum. In a case study of Shapai dam site, based on the evaluation of regional seismic activities and seismotectonic environment, ground motion input parameters at dam rock site with different exceeding probability, including the effective peak acceleration, design response spectra, amplitude and frequency non-stationarity acceleration time history, are determined.

**Key words:** Shapai dam site; scenario earthquake; evolutionary power spectrum; minimum phase spectrum; ground motion input parameters

收稿日期: 2010-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51069010); “十一五”国家科技支撑计划项目 (No. 2008BAB29B03); 水利部地震对大坝灾变机理与对策研究项目 (No. HF201011030)。

第一作者简介: 钟菊芳, 女, 1972 年生, 博士后, 副教授, 主要从事地震动输入及水工结构和岩土工程的抗震计算分析等方面研究。

E-mail: zhjf\_814@163.com

通讯作者: 温世亿, 男, 1975 年生, 博士, 主要从事水工结构、岩土工程方面的研究。E-mail: wenshiyi@nsbd.cn

## 1 引言

沙牌水电站是岷江支流草坡河上的龙头电站。坝址地震动峰值加速度为  $0.10g$ <sup>[1]</sup>, 设计<sup>[2]</sup>采用的基岩水平最大峰值加速度  $PGA$  为  $137.50 \text{ cm/s}^2$ 。2008 年 5.12 汶川 M8.0 级大地震时, 沙牌坝址遭遇的地震作用远远大于设计采用值, 大地震对沙牌水电工程造成了明显的影响。

5.12 汶川地震后, 中国地震区划图编委会颁布了《中国地震动参数区划图》1 号修改单<sup>[3]</sup>, 沙牌坝址处在地震动峰值加速度 1 号修改单中的  $0.20g$  区域内。从修改前后的坝址地震动峰值加速度的变化来看, 对沙牌坝址所在区域的地震危险性的认识有重大改变。鉴于中国地震动参数区划图及其修改单给出的是全国范围内的 50 年超越概率  $P_{50}=10\%$  的 II 类场地的平均结果, 而水工建筑物由于其自身的重要性及其一旦破坏将造成的灾害的严重性, 结构抗震计算分析和安全复核时, 还需要坝址区 50 年超越概率 ( $P_{50}=3\%$ ) 和 100 年超越概率 ( $P_{100}=2\%$ ) 的地震动参数值。据此, 为保证沙牌水电站抗震恢复的科学性和经济合理性, 以及更合理地评估沙牌水利枢纽工程的抗震安全性, 有必要根据 5.12 汶川地震资料, 以及地震后有关龙门山断裂带的最新研究成果重新进行地震安全性复核, 给出与目前地震危险性认识水平相一致的坝址地震动输入参数。

《水工建筑物抗震设计规范》<sup>[4-5]</sup>规定, 对复杂或特殊重要建筑物除采用振型分解反应谱法外, 还需补充时程分析计算地震作用效应。结构抗震计算分析中需要提供的输入参数有加速度反应谱和时程, 地震加速度反应谱通常可分解为设计地震加速度和归一化的设计反应谱。目前工程界普遍认为,  $PGA$  并不是反映地震作用的理想参数<sup>[6-9]</sup>, 我国 2001 年国家质量技术监督局颁布的国家标准《中国地震动参数区划图》<sup>[1]</sup>和我国 2005 年颁布的重大工程场地地震危险性分析所依据的国家标准《工程场地地震安全性评价技术规范》<sup>[10]</sup>均采用或要求采用有效峰值加速度  $EPA$ 。

对于重大工程, 地震动输入参数必须根据专门的地震危险性分析结果来确定。由地震危险性分析得到的一致概率反应谱综合了研究区内所有潜源的综合贡献, 具有“包络”特征, 不是地震环境下的真实样本实现, 不反映实际地震的频谱特性, 与实际地震反应谱相比, 它过高地估计了设计地震动的中长周期成分, 难于被工程界接受<sup>[6]</sup>。

目前工程抗震都是通过拟合设计反应谱, 人工

生成幅值非平稳的地震动加速度时程, 但频率含量仍是平稳的。已有的震害资料表明, 地震动频率非平稳对线性尤其是非线性结构地震响应具有显著影响<sup>[11-13]</sup>。地震动时程的频率非平稳性已日益受到工程界关注, 如何既精确地考虑输入的时频非平稳特性, 又能满足工程实际的需要, 国内外学者进行了大量的探索研究, 采用了现今较成熟的小波<sup>[14]</sup>、Wigner-Ville 分布、ARMA 模型和 Hilbert-Huang 变换<sup>[15]</sup>等时频非平稳信号分析工具进行时频非平稳地震动合成, 但未能给出合理的设计地震动过程, 其工程应用还具有局限性, 其中 Kameda, Sutigo 等<sup>[16-17]</sup>提出的采用时变功率谱和随机相位谱的时频非平稳地震动时程合成方法, 概念较为清晰, 方法简便, 具有较好的工程实用性, 但依该方法合成时程的时频特性只受时变功率谱的控制, 与相位无关, 与时频特性同时受相位谱影响的事实不符。

为了克服目前重大工程地震动输入参数确定中存在的上述问题, 为结构抗震计算分析提供合理的输入参数, 在 Kameda, Sutigo 等<sup>[16-17]</sup>的研究基础上, 提出以有效峰值加速度 ( $EPA$ ) 为参数, 由设定地震、时变功率谱和最小相位谱确定与坝址地震危险性相一致、具体地震的设计反应谱及强度和频率非平稳地震加速度时程的方法。

## 2 基于 $EPA$ 的设定地震方法

设定地震以满足工程抗震输入需要为目标, 将确定性地震事件与概率理念相结合, 给出设防水准条件下能在工程场址产生给定地震动的具体地震, 使地震危险性分析结果更方便工程应用。

基于  $EPA$  的设定地震方法的基本思路是: 在概率地震危险性分析的基础上确定对场点地震动参数贡献量最大的潜在震源区; 然后在最大贡献潜源区内, 取与  $EPA$  对应的最大震级空间联合分布概率对应的震级档的震级中值为设定地震的震级, 由  $EPA$  的衰减关系式来确定设定地震的震中距。

### 2.1 最大贡献潜源的确定

潜在震源区对坝址场地地震危险性贡献量的大小可由概率函数计算得到<sup>[18]</sup>:

$$C_k(Y \geq y) = \frac{P_k(Y \geq y)}{\sum_k P_k(Y \geq y)} \quad (1)$$

式中:  $C_k(Y \geq y)$  为第  $k$  个潜源对场地的贡献概率, 以比例系数  $C_k$  最大对应的潜源为最大贡献潜源;  $P_k(Y \geq y)$  为潜在震源区  $k$  发生地震时强度  $Y$  超过  $y$  的年超越概率<sup>[19]</sup>;

$$P_k(Y \geq y) = 1 - \exp \left( -\frac{2\nu}{\beta} \iiint \sum_{j=1}^{N_m} P_k(Y \geq y|E) f_m(m_j) \cdot \sin \left( \frac{1}{2} \beta \Delta m \right) f(\theta) f_{i,m_j} / S_i dx dy d\theta \right) \quad (2)$$

## 2.2 震级空间联合分布概率的计算

分析时将地震发生的震级和空间位置看作是相互独立的, 震级空间联合分布概率函数可由震级概率分布函数和空间位置概率分布函数相乘, 并归一化可得

$$P(m_j, R|Y \geq y) = \frac{P(m_j)P(R|m_j, Y \geq y)}{\sum_{j=1}^{N_m} P(m_j)P(R|m_j, Y \geq y)} \quad (3)$$

式中:  $P(m_j)$  为潜在震源区内  $m_j$  震级概率分布函数;  $P(R|m_j, Y \geq y)$  为空间位置概率分布函数, 其中  $P(m_j)$ 、 $P(R|m_j, Y \geq y)$  可按式计算:

$$P_l(m_j) = v_l(m_j) / \sum_{j=1}^{N_m} v_l(m_j) \quad (4)$$

$$P(R|m_j, Y \geq y) = \begin{cases} L_j / L, & (\text{主干断裂明显}) \\ S_j / S, & (\text{主干断裂不明显}) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $L$ 、 $S$  分别为潜源内主干断裂的总长度和总面积;  $L_j$ 、 $S_j$  分别为主干断裂上能使场点产生大于或等于给定地震动参数值  $y(p_0)$  的  $m_j$  级地震发生的有效长度和面积范围;  $N_m = \frac{M_u - M_0}{\Delta m}$  为潜在震源的震级分档数,  $M_u$  为潜在震源区的震级上限,  $\Delta m$  为震级分档值,  $M_0$  为地震带震级下限;  $v_l(m_j)$  为潜在震源区内各震级档地震的年发生率, 其表达式为

$$v_l(m_j) = v(m_j) f_{l,m_j} \quad (6)$$

式中:  $f_{l,m_j}$  为潜在震源区内各震级档地震的空间分布函数;  $v(m_j)$  为地震带内  $m_j$  震级档的地震年平均发生率<sup>[20]</sup>:

$$v(m_j) = \frac{2\nu \exp(-\beta(m_j - M_0)) \sinh \left( \frac{1}{2} \beta \Delta m \right)}{1 - \exp(-\beta(M_{uc} - M_0))} \quad (7)$$

式中:  $\beta = b \ln 10$ ,  $b$  为震级频度关系式中参数;  $\sinh \left( \frac{1}{2} \beta \Delta m \right)$  为双曲正弦函数;  $\nu$ 、 $M_{uc}$  分别为地震带的年发生率和震级上限。

## 3 基于时变功率谱和最小相位谱的强度和频率非平稳加速度时程合成方法

重大工程场地输入用地震加速度时程必须与结构本身的动力特性、场址处的地震环境及场地条

件相关, 以满足最不利条件的要求, 同时还需考虑时程的强度和频率非平稳性。根据设定地震结果, 基于时变功率谱和最小相位谱的非平稳地震动时程合成模型为

$$a(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2G_x(t, \omega_k) \Delta \omega} \cos(\omega_k t + \varphi_{\min}(\omega_k)) \quad (8)$$

式中:  $a(t)$  为非平稳加速度时程;  $\Delta \omega$  为频率间隔;  $\varphi_{\min}(\omega_k)$  为第  $k$  个频率点的最小相位;  $G_x(t, \omega_k)$  为  $t$  时刻第  $k$  频率点的时变功率谱。

显然, 采用式 (8) 进行非平稳加速度时程合成的关键是时变功率谱和最小相位谱的确定。

### 3.1 时变功率谱的确定

时变功率  $G_x(t, \omega_k)$  可按式<sup>[16-17]</sup>计算得到:

$$\sqrt{G_x(t, \omega)} = \begin{cases} a_m(\omega) \frac{t - t_s(\omega)}{t_p(\omega)} \exp \left( 1 - \frac{t - t_s(\omega)}{t_p(\omega)} \right), & (t \geq t_s(\omega)) \\ 0, & (t < t_s(\omega)) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $t_s(\omega)$  为  $\omega$  频率点时变功率谱起始时间点, 通常取  $G(t, \omega) = 0.1 G_{\max}(t, \omega)$  对应的  $t$  值;  $t_s(\omega) + t_p(\omega)$  为时变功率谱峰值对应的时间;  $a_m(\omega)$  为时变功率谱峰值的方根。

模型参数  $a_m(\omega)$ 、 $t_p(\omega)$ 、 $t_s(\omega)$  可根据设定地震的震级和震中距, 依  $a_m(\omega)$ 、 $t_p(\omega)$ 、 $t_s(\omega)$  随震级、震中距离及频率变化的衰减式<sup>[21]</sup>计算得到。

### 3.2 最小相位谱的推求

作 Fourier 变换, 可得到给定的信号  $x(t)$  的傅氏谱  $A(\omega)$  和相位谱  $\theta(\omega)$ 。根据  $\theta(\omega) = \theta_p(\omega) + 2N\pi$  ( $N$  为自然数) 和  $\exp[i\theta(\omega)] = \exp[i\theta_p(\omega)]$  的特性, 可找到一条相位谱满足: 对于任意给定的  $\omega$  值, 有  $|\theta_p(\omega)| < |\theta(\omega)|$ ,  $\theta_p(\omega)$  即为所求的最小相位谱  $\theta_{\min}(\omega)$ 。

与给定幅值谱对应的最小相位谱可按下述步骤推求得到:

①将  $0 \sim 2\pi$  内随机均匀分布的相位角  $\varphi(\omega)$  代替式 (8) 中的最小相位谱  $\theta_{\min}(\omega)$  进行加速度时程合成, 得到初始时程  $a_0(t)$ 。

②对  $a_0(t)$  作 Fourier 变换, 得到幅值谱  $A(\omega)$ 。

③定义<sup>[21]</sup>:

$$y(n) = \begin{cases} 0, & (n < 0) \\ w(0), & (n = 0) \\ 2w(n), & (n > 0) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $w(n)$  为幅值谱  $A(\omega)$  对数值  $\lg[A(\omega)]$  的 Fourier 逆等换结果, 即

$$w(n) = \text{IFT} \{ \lg[A(\omega)] \} \quad (11)$$

④对  $y(n)$  进行 Fourier 变换, 虚部即为  $\theta_{\min}(\omega)$ 。

### 3.3 非平稳加速度时程合成方法

基于时变功率谱和最小相位的强度和频率非平稳加速度时程合成步骤为: ①将坝址设定地震结果代入时变功率谱模型参数  $a_m(\omega)$ 、 $t_p(\omega)$ 、 $t_s(\omega)$  随震级、震中距离和频率变化的衰减式, 计算得到不同频率点的  $a_m(\omega)$ 、 $t_p(\omega)$ 、 $t_s(\omega)$ ; ②将不同频率点的  $a_m(\omega)$ 、 $t_p(\omega)$ 、 $t_s(\omega)$  值代入时变功率谱模型式 (9), 计算得到不同时间和频率点的  $G(t, \omega)$  值; ③按最小相位谱的推求方法, 得到与场地设定地震  $M$ 、 $R$  对应的最小相位谱  $\theta_{\min}(t, \omega)$ ; ④将  $G(t, \omega)$  和  $\theta_{\min}(t, \omega)$  代入式 (8), 采用三角级数叠加法得到时程  $a'(t)$ ; ⑤采用 2 阶全通滤波器对  $a'(t)$  滤波后得到满足要求的非平稳时程  $a(t)$ 。

## 4 沙牌坝址地震动输入参数的确定

### 4.1 坝址地震危险性计算分析

按《工程场地地震安全性评价》<sup>[10]</sup> 技术规范要求, 地震危险性计算分析包括地震区带及潜在震源区的划分、地震活动性参数的确定、地震动参数衰减关系选取以及概率计算。地震区带及潜在震源区的划分方案采用中国地震局颁发的《中国地震动参数区划图》一号修改单<sup>[3]</sup>中的方案。该方案是在 2008 年汶川地震后, 在《中国地震动参数区划图》<sup>[1]</sup>的基础上, 通过对汶川 8 级地震的地表破裂带、发震构造、余震分布等资料的综合分析后, 重新对龙门山构造带及附近潜在震源区进行论证和划分的。徐锡伟等<sup>[22]</sup>根据目前所获得的资料证明了一号修改单中有关潜在震源区划分方案的合理性。沙牌坝址研究区潜源划分方案见图 1, 图中括号内、外的数字分别表示为潜在震源的震级上限和潜在震源的编号。各地震带的地震活动性参数见表 1, 表中的  $M_{\text{uc}}$  为地震带的震级上限;  $b$  为震级频度关系式中的  $b$  值;  $\nu_4$  为地震带内大于等于 4.0 级地震的年平均发生率。

由于研究区域范围内强震记录很少, 不足以直接利用这些记录资料进行衰减关系式的拟合, 这里直接选用能反映大震和近场饱和特性的俞言祥<sup>[25]</sup>美国西部水平基岩衰减关系式:

$$\left. \begin{aligned} \lg PGA &= 1.297 + 0.566M - 1.723 \cdot \\ &\lg(R + 1.046 \exp(0.451M)), \sigma = 0.240 \\ \lg Sa(0.2) &= 1.589 + 0.573M - 1.721 \\ &\lg(R + 1.046 \exp(0.451M)), \sigma = 0.261 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中:  $M$  为震级;  $Sa$  为加速度反应谱。

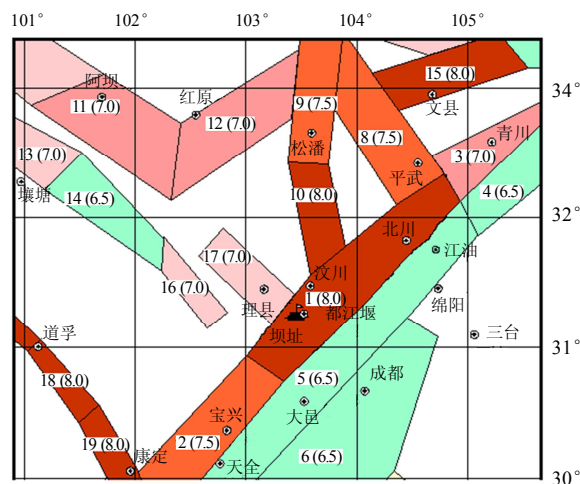


图 1 潜在震源区位置分布图<sup>[23]</sup>

Fig.1 Distribution of potential seismic sources

表 1 研究区内各地震带地震活动性参数表<sup>[24]</sup>

Table 1 Seismic activity parameters of seismic statistical zone

地震带名称	$M_{\text{uc}}$	$b$	$\nu_4$
龙门山地震带	8.0	0.731	5.105
鲜水河-滇东地震带	8.0	0.831	1.670
巴颜喀拉地震带	8.5	0.588	3.156
长江中游地震带	7.0	0.989	28.31

经概率地震危险性计算分析, 得到不同超越概率下沙牌坝址基岩有效峰值加速度  $EPA$ , 见表 2, 为便于比较分析, 表 2 中同时给出了坝址最大峰值加速度  $PGA$  值, 从表中可以看出, 大小时  $PGA > EPA$ ; 小概率时  $EPA > PGA$ 。

表 2 不同超越概率下沙牌坝址基岩加速度峰值参数表

Table 2 Peak acceleration of different exceedance probability for Shapai dam bedrock area

加速度峰值	$P_{50}/\%$				$P_{100}/\%$
	63	10	5	3	2
$EPA/(\text{cm/s}^2)$	48.6	178.0	241.7	302.9	468.8
$PGA/(\text{cm/s}^2)$	53.0	203.5	275.6	325.5	437.6

经计算分析, 对沙牌坝址地震危险性贡献最大的潜在震源为 1 号潜源, 该潜在震源位于龙门山地震带内。

### 4.2 坝址设定地震及设计反应谱的确定

在 1 号最大贡献内, 依据以  $EPA$  为参数的设定地震方法计算得到坝址基岩场地不同超越概率的设定地震的震级和震中距见表 3 所列。将设定地震的 ( $M$ 、 $R$ ) 代入俞言祥<sup>[24]</sup>美国西部基岩水平加速度反应谱的衰减关系式, 得到与设定地震对应的不同超越概率的坝址设计反应谱, 见图 2。

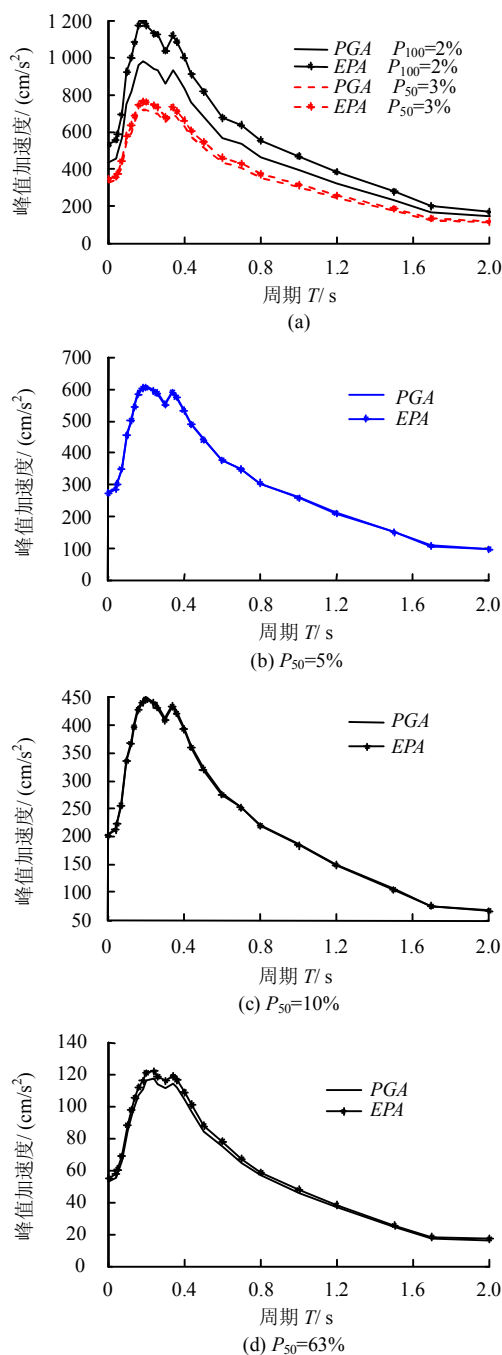


图2 与设定地震对应的不同超越概率的坝址设计反应谱  
Fig.2 Design response spectrum of different exceedance probability according to scenario earthquake

为了进一步论证基于  $EPA$  的设定地震对应的设计反应谱的合理性, 表 3 同时给出了以  $PGA$  为参数的设定地震结果, 图 2 中也给出了相应的反应谱。从图中可以看出, 大概率时, 基于  $EPA$  的设计反应谱与基于  $PGA$  的相应值相当; 小概率时, 基于  $EPA$  的设计反应谱大于基于  $PGA$  的设计反应谱。对于沙牌这类水利水电工程来说, 所关心的是小概率 (100 年超越概率 2%) 地震对大坝的威胁, 显然, 采用基于  $EPA$  的设计反应谱进行抗震设计, 比采用基于  $PGA$  的设计反应谱, 要更为安全可靠。

表 3 坝址基岩场地设定地震结果

Table 3 Scenario earthquake of the dam bedrock area

超越概率	$EPA$ /( $cm/s^2$ )	$M$	$R$ / km	$PGA$ /( $cm/s^2$ )	$M$	$R$ / km
$P_{100}=2\%$	468.8	7.95	23.51	437.6	7.45	16.36
$P_{50}=3\%$	302.9	7.35	21.04	325.5	7.25	19.92
$P_{50}=5\%$	241.7	7.05	19.99	275.6	7.05	19.77
$P_{50}=10\%$	178.0	7.05	28.77	203.5	7.05	28.41
$P_{50}=63\%$	48.6	5.55	23.52	53.0	5.55	24.82

#### 4.3 坝址非平稳地震加速度时程的合成

采用本文提出的基于时变功率谱和最小相位的强度和频率非平稳加速度时程合成方法, 得到以  $EPA$  为参数的 50 年超越概率分别为 10%、3%、5% 和 100 年超越概率为 2% 的沙牌坝址地震加速度时程, 如图 3 所示。

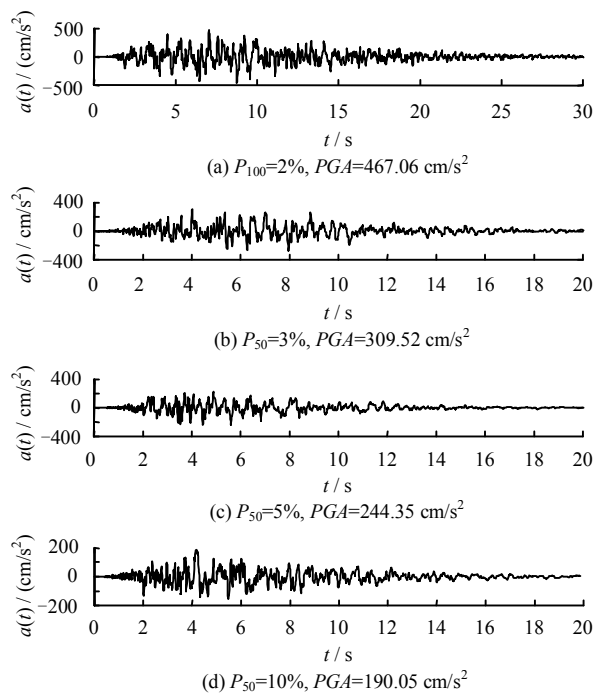


图3 坝址非平稳地震加速度时程曲线图

Fig.3 Synthetic nonstationary acceleration time history curves of the dam area

## 5 结 语

针对目前加速度时程合成过程中频率非平稳性仍没得到很好解决现状, 本文在 Kameda 和 Sutigo 等<sup>[17-18]</sup>的研究基础上, 以设定地震研究为基础, 提出了基于时变功率谱和最小相位谱的强度和频率非平稳加速度时程合成方法。该方法不仅能得到强度和频率均分为非平稳的地震加速度时程, 还克服了依 Sutigo 等<sup>[17-18]</sup>提出的基于时变功率谱和随机相位的时程合成方法得到的时程的时频特性只受时变功率谱的控制, 与相位无关的缺陷。

针对依地震危险性计算得到的设计反应谱不是真实地震的反应谱,不能保证与坝址地震危险性相一致的现状,结合四川沙牌大坝工程,提出了一套适用于重大水利水电工程基岩场地地震动输入参数——峰值加速度、设计反应谱及强度和频率非平稳地震加速度时程的确定方法。该方法以有效峰值加速度  $EPA$  为参数,通过概率地震危险性分析来确定坝址峰值加速度和对坝址地震危险性贡献量最大的潜在震源区;在最大贡献潜在震源区内依震级空间联合概率分布函数最大法确定设定地震的震级,由衰减关系确定设定地震的震中距和设计反应谱;最后利用设定地震结果,采用基于时变功率谱和最小相位谱的强度和频率非平稳地震加速度时程合成方法进行坝址加速度时程的合成。

根据 5.12 汶川地震后对龙门山等地震带的最新研究成果,在对沙牌坝址所处的区域及近场区地震活动及地震构造环境重新分析评价的基础上,采用地震危险性综合概率法计算得到了坝址不同超越概率下的基岩水平地震动的有效峰值加速度:50 年超越概率分别为 63%、10%、5%、3% 对应的  $EPA$  为 48.6、178.0、241.7、302.9  $\text{cm/s}^2$ ,100 年超越概率为 2% 的  $EPA$  为 468.8  $\text{cm/s}^2$ 。

在对沙牌坝址地震危险性贡献最大的 1 号潜在震源区内,依据震级空间联合概率分布函数最大值法得到了坝址不同超越概率下的设定地震的震级和震中距离;根据设定地震的震级和震中距计算得到了坝址不同超越概率下的设计反应谱值,并分析论证了所得设计反应谱的合理性;最后给出了与设定地震对应的坝址不同超越概率下的非平稳加速度时程曲线。

本文在地震危险性分析和设定地震过程中均以  $EPA$  为参数,确保了与现行规范的一致性;而且坝址场地设计反应谱是依设定地震得到的,是具体地震的反应谱,确保了与坝址区域地震构造及地震危险性的一致性,克服了一致概率反应谱的包络特征等的不足。另外,所得到的坝址加速度时程是依设定地震、时变功率谱和最小相位谱得到的,不仅与坝址地质环境和地震危险性一致,而且利用时变功率谱和最小相位谱充分反映了加速度时程的强度和频率非平稳性,与实际的地震加速度时程更为相似。

### 参考文献

[1] 国家地震安全性评定委员会,全国地震标准化技术委员会. GB18306—2001 中国地震动参数区划图[S]. 北京:中国标准出版社,2001.

- [2] 四川省地震局工程地震研究所. 汶川沙牌水电站工程场地地震危险性概率分析及场地地震动参数确定报告[R]. 成都:四川省地震局工程地震研究所,1999.
- [3] 国家地震安全性评定委员会,全国地震标准化技术委员会. GB18306—2001 中国地震动参数区划图国家标准第 1 号修改单[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [4] 中国水利水电科学研究院. SL203—97 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京:中国电子出版社,1997.
- [5] 中国水利水电科学研究院. DL5073—2000 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京:中国电子出版社,2000.
- [6] 陈厚群,郭明珠. 重大工程场地设计地震动参数选择[C]//中国水利水电科学研究院会议文集. 北京:[出版者不详],2002:552—568.
- [7] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社,1988.
- [8] 胡聿贤. 中国院士书系——地震工程[M]. 石家庄:河北教育出版社,2000.
- [9] HANKS T C.  $b$  value and  $\omega^{-\gamma}$  seismic source models: implications for tectonic stress variation along active crustal fault zones and the estimation of high-frequency strong ground motion[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1979, 84(B5): 2235—2242.
- [10] 卢寿德. GB17741—2005 工程场地地震安全性评价[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [11] CONTE J P. Effects of earthquake frequency non-stationary on inelastic structural response[C]//Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering. Madrid, Spain: [s. n.], 1992: 3645—3651.
- [12] 苏栋,李相崧. 地震作用下自由场中饱和砂土的应力-应变推导[J]. 岩土力学,2010,31(1): 277—281,308. SU Dong, LI Xiang-song. Derivation of stress and strain of saturated sand in free ground under seismic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 277—281, 308.
- [13] 颜可珍,刘能源,夏唐代. 基于判别分析法的地震砂土液化预测研究[J]. 岩土力学,2009,30(7): 2049—2052. YAN Ke-zhen, LIU Neng-yuan, XIA Tang-dai. Discriminant analysis model for prediction of sand soil liquefaction during earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2049—2052.
- [14] GOUPILLAUD P, GROSSMANN A, MORLET J. Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis[J]. **Ge exploration**, 1984, 23(1): 85—102.
- [15] HUANG NE, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C]//Proceedings of the Royal Society of London. London: [s. n.], 1998: 903—995.



- [16] GOTO H, SUGITO M, KAMEDA H, et al. Prediction of nonstationary earthquake motions for moderate and Great earthquakes on rock surface[R]. Annuals Disaster Prevention Research Institute. Japan: Kyoto University, 1984: 19—48.
- [17] SUGITO M, FURUMOTO Y, SUGIYAMA, T. Strong motion prediction rock surface by superposed evolutionary spectra[C]//Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. New Zealand: [s. n.], 2000.
- [18] ISHIKAWA Y, KAMEDA H. Hazard-consistent magnitude and distance for extended seismic risk analysis[C]//Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo, Japan: [s. n.], 1988: 89—94.
- [19] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [20] 钟菊芳. 重大工程场地地震动输入参数研究[博士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [21] GONI JUAN JOSE. Simulation of earthquake ground acceleration using a seismological model of the Fourier amplitude spectrum and its minimum phase spectrum[D]. U. S. A.: Tulane University, 1989.
- [22] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 Ms8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 597—629.
- XU Xi-wei, WEN Xue-ze, YE Jian-qing, et al. The Ms8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure[J]. **Seismology and Geology**, 2008, 30(3): 597—629.
- [23] 中国地震局地震预测研究所, 中国地震灾害防御中心. 四川省岷江紫坪铺水利枢纽工程场地地震安全性评价复核报告[R]. 成都: 中国地震局地震预测研究所, 2008.
- [24] 俞言祥. 长周期地震动衰减关系研究[博士学位论文 D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2002.