

文章编号:1671-1637(2013)01-0027-09

# 大跨径在役桥梁随机地震动模拟方法

赵 珺<sup>1,2</sup>, 牛荻涛<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 理学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:**考虑桥梁结构的服役期对地震荷载的影响,应用等超越概率的方法将地震作用进行折减,将公路桥梁抗震规范中的两级设防标准扩展为三级设防标准。考虑地震动的随机性,应用概率理论将目标反应谱随机化,结合相干函数和相位差谱理论,采用 MATLAB 程序,生成在役桥梁结构空间相关多点非平稳随机地震动。模拟结果表明:应用等超越概率的方法可以将地震动峰值加速度进行合理折减;应用概率理论进行反应谱随机抽样,得到的随机地震反应谱能够较好地反映地震动的随机性,其中 30 条随机反应谱的变异系数最大差值为 0.064,精度符合要求;计算反应谱与随机目标反应谱拟合情况良好,1、2 号目标点的拟合优度值分别为 0.82 和 0.81,精度符合要求;合成的人工地震动能够反映在役桥梁结构的已服役期和地震动的随机性,接近实际的地震记录。

**关键词:**桥梁工程;随机地震动;等超越概率;概率理论;相干函数;相位差谱

**中图分类号:**U442.55

**文献标志码:**A

## Simulation method of random ground motion for large-span bridge in service

ZHAO Jun<sup>1,2</sup>, NIU Di-tao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

2. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

**Abstract:** Considering the influence of bridge structure service period on earthquake loading, equal exceeding probability method was applied to reduce earthquake role, and two fortification criterions of current anti-seismic code for highway bridge were supplemented to three levels. The probability theory was used to randomize target response spectrum by considering the randomness of ground motion. Combined with coherence function and phase difference spectrum theory, the non-stationary random ground motions of spatial correlation multi-points for existing bridge structure were generated by using MATLAB programming. Simulation result indicates that ground motion peak acceleration can be reduced rationally by using equal exceeding probability method. Probability theory can be used to get random response spectrum, which can well simulate the randomness of ground motion, and the variation coefficient maximum difference value of thirty random response spectrums is 0.064, it meets accuracy requirement. The calculating response spectrums fit well to random target response spectrums, the goodnesses of fit for points No. 1 and No. 2 are 0.82 and 0.81 respectively, they meet accuracy requirement. The artificial ground motions can reflect the service period of existing bridge structure and the

收稿日期:2012-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51278403,50725824);陕西省“13115”科技创新工程重大科技专项项目(2010ZDKG-55);西安建筑科技大学青年科技基金项目(QN1033)

作者简介:赵 珺(1980-),女,陕西西安人,西安建筑科技大学讲师,工学博士研究生,从事桥梁抗震可靠度评估研究。

导师简介:牛荻涛(1963-),男,陕西华县人,西安建筑科技大学教授,工学博士。

randomness of ground motion, and are similar to actual earthquake records. 7 tabs, 12 figs, 23 refs.

**Key words:** bridge engineering; random ground motion; equal exceeding probability; probability theory; coherence function; phase difference spectrum

**Author resumes:** ZHAO Jun(1980-), female, lecturer, doctoral student, +86-29-82201416, tongfeibridge@126.com; NIU Di-tao(1963-), male, professor, PhD, +86-29-82205985, niuditao@163.com.

## 0 引 言

对处于服役期的大跨径桥梁结构进行地震动时程反应分析时,首先需要确定所需输入的地震加速度时程,但是现有的实际地震动记录远不能满足工程抗震的需要,因此,人工模拟地震动成为了地震动激励的重要来源。自 20 世纪 40 年代以来,人们就开始着手于人工地震动的合成研究。从真实的地震动记录中发现,地震动是由上升段、持续强震段、衰减段组成,并且这 3 个阶段都同时体现了地震动强度与频率的非平稳性。1974 年,Scanlan 等提出了用三角级数模型模拟地震动加速度时程,该方法合成的地震波与实际地震波的形状差别较大<sup>[1]</sup>;1979 年,大崎顺彦提出地震动的非平稳特性主要是由相位差谱决定的理论,该理论利用相位差谱的统计模型生成的人工地震动在时域和频域内均具有非平稳的特性,与实际的地震记录更加吻合<sup>[2]</sup>;Bi 等基于实测地震记录和规范化反应谱曲线,针对不同场址提出了多种人工地震动场模型,这些模型能够更合理地反映震源特征和地质因素对结构的影响<sup>[2-4]</sup>;赵凤新等利用在时域内叠加窄带时程的方法调整初始时程,进一步提高目标反应谱的拟合精度<sup>[5]</sup>;杨庆山等根据相位倒数的显式计算公式,从能量的角度解释相位倒数的均值决定了时程峰值的发生时刻,相位倒数的方差决定强震段的持续时间<sup>[6-7]</sup>;徐国栋等根据功率谱、平方和、时域包线函数这 3 个参量合成的人工地震动更加符合实际情况<sup>[8]</sup>。

目前,中国正处于对大跨度桥梁新建和维修加固并存的关键时期,地震的巨大破坏性,迫使工程人员应及时对服役桥梁结构进行抗震性能的评估,因此,需要大量的人工模拟地震动。但是针对在役结构的人工模拟地震动的研究还存在不足,主要问题有:没有全面考虑现役结构的服役时间,由于现役结构已经服役了一段时间,若仍采用抗震设计规范中的地震作用进行分析,显然不合理且过于保守,所以针对服役结构应考虑后续使用期的缩短对地震荷载

作用进行折减<sup>[9-10]</sup>;公路桥梁抗震规范中的抗震设防标准只有两级,由于没有对应的超越概率,荷载等级划分界限不明确,使得模拟地震动作用时不方便使用,所以需要进一步细化;没有很好考虑地震动的随机性,由于人工合成地震动需要建立目标反应谱,现行规范中的设计反应谱只给出了地震动反应谱的均值,没有给出反应谱的方差,忽视了反应谱的随机特性,因此,若能生成随机反应谱,在此基础上再进行人工地震波的合成,这样的地震动激励将更加合理。针对以上存在的问题,本文首先将桥梁的抗震设防标准进行补充细化,然后重点考虑桥梁结构服役期内地震作用的折减和地震作用的随机性,最后进行空间相关多点非平稳人工地震动的模拟。

## 1 确定服役桥梁结构的地震荷载作用

### 1.1 桥梁抗震设防标准的细化

《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)中通过可变荷载的统计分析规定公路桥涵设计基准期为 100 年<sup>[11]</sup>。《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)采用的是两级抗震设防目标<sup>[12]</sup>。当遭受桥梁设计基准期内发生率较高的地震影响 E1 时,各类桥梁一般不受损坏或不需修复可继续使用;当遭受桥梁设计基准期内发生概率较低的地震影响 E2 时,A 类桥梁一般不受损坏或不需要修复可以继续使用,B、C 类桥梁应保证不致倒塌或产生严重结构损伤,经加固修复后可继续使用。其中 A 类桥梁是单跨跨径超过 150 m 的特大桥,其余分类可参见相关规范<sup>[12]</sup>。

中国建筑结构设计基准期是 50 年,其抗震规范采用的是三级设防标准,小震(选择设计基准期 50 年内超越概率 63.2%的烈度)不坏,中震(选择设计基准期 50 年内超越概率 10%的烈度)可修,大震(50 年内超越概率 2%~3%为烈度)不倒<sup>[13]</sup>。

公路桥梁抗震设防标准与建筑结构设防标准相比没有对应的超越概率,并且标准等级划分较为简单,使用时也不方便,所以需要进一步细化。参照建

筑结构的抗震规范得<sup>[13-14]</sup>

$$T=-\frac{T_0}{\ln(1-P)} \tag{1}$$

式中: $T$  为地震重现期; $P$  为地震超越概率; $T_0$  为设计基准期。

根据相同的地震重现期描述相同的地震动特征,依据建筑结构抗震规范中的地震重现期和式(1),可以得到公路桥梁的 3 个地震作用水平与三级抗震设防标准,见表 1、2。

表 1 公路桥梁的 3 个地震作用水平

Tab. 1 Three seismic action levels of highway bridge

设计基准期/年	地震超越概率/%	地震重现期/年
100	86.2 (多遇地震)	50
100	19.0 (中震)	474
100	3.9 (罕遇地震)	2 474

表 2 公路桥梁的三级抗震设防标准

Tab. 2 Three levels of seismic fortification criterion of highway bridge

地震超越概率/%	结构性能水平
86.2 (多遇地震)	各类桥梁不受损坏或不需修复可正常使用
19.0 (中震)	A 类桥梁不受损坏可正常使用,B 类桥梁修复后可继续使用,C 类桥梁防止严重损坏,修复后可以继续使用
3.9 (罕遇地震)	A 类桥梁修复后可继续使用,B 类和 C 类桥梁应防止倒塌,防止产生严重的结构损伤

1.2 服役桥梁地震作用荷载的折减

现役桥梁结构由于已经服役了一段时间,结构的后续服役期通常小于设计基准期,若仍采用抗震设计规范中的地震作用,结构地震响应分析的计算结果则会过于保守,并且不合理,所以应该根据后续使用期的缩短,对地震作用进行折减。

本文确定桥梁结构后续服役期的地震作用采用的是等超越概率的方法,即取现役结构在后续服役期内荷载作用的超越概率等于设计结构在设计使用年限内的荷载作用的超越概率<sup>[10,15]</sup>,由此可计算得到不同的后续服役期桥梁结构的加速度峰值,供人工合成地震动使用。

假设地震的发生概率服从均匀的泊松过程,按照等超越概率的原则可以得到地震重现期  $T$  与设计基准期 100 年内的超越概率  $P$  的关系为<sup>[16]</sup>

$$P=1-\exp(-100/T) \tag{2}$$

按照式(1)计算不同后续服役期的重现期  $T$ ,然后按照式(2)计算结构设计基准期 100 年内的超越概率  $P$ ,见表 3。

表 3 后续服役期的地震超越概率

Tab. 3 Seismic exceeding probabilities of follow-up service

后续服役期/年	多遇地震		中震		罕遇地震	
	重现期	超越概率	重现期	超越概率	重现期	超越概率
	$T$ /年	$P$ /%	$T$ /年	$P$ /%	$T$ /年	$P$ /%
10	18.4	99.5	47.5	87.9	247.4	33.3
20	20.4	99.2	95.0	65.3	494.8	18.3
30	23.0	98.7	142.5	50.6	742.2	12.6
40	25.6	98.0	190.0	41.1	989.6	9.6
50	28.8	96.9	237.5	34.5	1 237.0	7.8
60	32.0	95.6	285.0	29.7	1 484.4	6.5
70	36.0	93.8	332.5	26.1	1 731.8	5.6
80	40.0	91.8	380.0	23.2	1 979.2	4.9
90	45.0	89.2	427.5	20.9	2 226.6	4.4
100	50.0	86.2	475.0	19.0	2 474.0	3.9

确定了后续服役期的地震超越概率,根据地震加速度危险性曲线公式<sup>[14]</sup>,就可以得到在役结构的地震峰值加速度为

$$\lg[-\ln(1-P)]+0.977\ 3= k\lg\left[\frac{1.5-\lg(A)}{1.5-\lg(A_{19})}\right] \tag{3}$$

式中: $k$  为形状参数,根据全国的 3 个危险性分区,I 区  $k$  为 6,II 区  $k$  为 10,III 区  $k$  为 20<sup>[14]</sup>;  $A$  为水平向设计基本地震动峰值加速度; $A_{19}$  为超越概率 19% 的峰值加速度,同理式中还可代入超越概率 86.2% 的峰值加速度  $A_{86.2}$  和超越概率 3.9% 的峰值加速度  $A_{3.9}$ ,取  $A_{19}$ 、 $A_{86.2}$ 、 $A_{3.9}$  分别为 0.2g、0.1g、0.5g; $g$  为重力加速度。根据式(3)可得出不同后续服役期对应的地震峰值加速度,见表 4。确定了考虑后续服役期的地震峰值加速度,就可以求解用于人工合成地震动的加速度反应谱。

2 地震动目标反应谱的随机化

《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)<sup>[12]</sup>中的公式给出的目标反应谱仅是均值,为了使人工模拟地震动与实际地震动更为相似,可将目标反应谱随机化,以此更好地反映模拟地震动的随机性。

反应谱是具有一定固有周期和阻尼的单自由度体系在地震动作用下的最大反应,将最大反应值作为随机变量处理就可以使反应谱随机化。首先,确定反应谱的概率密度分布函数,用于生成随机反应谱。由于反应谱是最大反应值,所以反应谱的分布函数就是单自由度体系地震反应过程  $y(t)$  的最大反应  $y_m$  的分布函数, $t$  为时间。

表 4 后续服役期的地震峰值加速度  
Tab. 4 Seismic peak accelerations of follow-up service

后续服役 期/年	地震峰值加速度/(m·s <sup>-2</sup> )								
	多遇地震(86.2%)			中震(19.0%)			罕遇地震(3.9%)		
	I 区 k=6	II 区 k=10	III 区 k=20	I 区 k=6	II 区 k=10	III 区 k=20	I 区 k=6	II 区 k=10	III 区 k=20
10	0.018 8	0.290 6	0.768 9	0.322 7	0.740 9	1.249 7	3.061 6	3.742 7	4.301 9
20	0.042 3	0.397 9	0.872 7	0.532 2	0.952 7	1.395 1	3.949 8	4.317 7	4.604 5
30	0.065 2	0.473 4	0.937 9	0.695 1	1.094 9	1.485 3	4.524 9	4.673 2	4.786 1
40	0.087 1	0.533 4	0.986 2	0.831 2	1.204 5	1.551 6	4.956 1	4.933 6	4.916 8
50	0.108 0	0.583 7	1.024 9	0.949 1	1.294 6	1.604 4	5.303 1	5.140 1	5.019 4
60	0.128 0	0.627 3	1.057 4	1.054 1	1.371 5	1.648 4	5.594 2	5.311 6	5.103 9
70	0.147 3	0.666 1	1.085 3	1.149 1	1.438 9	1.686 2	5.845 4	5.458 6	5.175 9
80	0.165 7	0.701 1	1.109 9	1.236 1	1.499 1	1.719 4	6.066 7	5.587 3	5.238 6
90	0.183 5	0.733 1	1.131 9	1.316 5	1.553 6	1.749 1	6.264 6	5.701 8	5.294 2
100	0.200 8	0.762 6	1.151 9	1.391 4	1.603 4	1.775 9	6.443 7	5.805 1	5.344 2

由假设得到单自由度的最大反应服从泊松分布,其分布函数  $F(y_m)$  为<sup>[17-18]</sup>

$$F(y_m) = \exp\left[-\nu T_d \exp\left(-\frac{y_m^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] \quad (4)$$

$$\nu_i = \frac{\omega_{si}}{\pi}$$

式中:  $T_d$  为地震动持时;  $\nu$  为反应过程  $y(t)$  的期望越零率,其分量是  $\nu_i$ ;  $\omega_{si}$  为第  $i$  个固有频率;  $\sigma_y$  为地震反应过程的均方根。

已知均值和标准差分别为<sup>[17]</sup>

$$\mu_m = \left[ \sqrt{2\ln(\nu T_d)} + \frac{0.577 2}{\sqrt{2\ln(\nu T_d)}} \right] \sigma_y \quad (5)$$

$$\sigma_m = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{\sqrt{2\ln(\nu T_d)}} \sigma_y \quad (6)$$

将式(6)除以式(5)可以得到

$$\delta_m = \frac{\sigma_m}{\mu_m} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{0.577 2 + 2\ln(\nu T_d)} \quad (7)$$

式中:  $\mu_m$ 、 $\sigma_m$  分别为最大反应的均值和标准差;  $\delta_m$  为最大反应的变异系数。

求解式(4)的反函数,可得  $y_m$  为

$$y_m = \sigma_y \sqrt{2\ln(\nu T_d) - 2\ln\{\ln[F^{-1}(y_m)]\}} \quad (8)$$

将式(5)代入式(8)可得

$$y_m = \frac{\mu_m \sqrt{2\ln(\nu T_d) - 2\ln\{\ln[F^{-1}(y_m)]\}}}{\sqrt{2\ln(\nu T_d)} + 0.577 2 / \sqrt{2\ln(\nu T_d)}} \quad (9)$$

根据式(9),运用概率方法进行随机抽样就可以生成一组均值和方差的随机反应谱,反应谱的均值  $\mu_m$  可由规范中的反应谱公式给出<sup>[12]</sup>。将产生的随机反应谱作为目标反应谱,就可以生成考虑地震反应谱均值和方差随机特性的人工地震动。

### 3 基于相关性与非平稳特性的地震动模拟

对于大跨度桥梁结构,其各支承点处地面运动各不相同,同时地震动还具有强度和频率非平稳的特性,因此,人工模拟地震动必须要反映空间点的相关性和地震动的非平稳性。

#### 3.1 地震动的空间相关性

大跨径桥梁在遭受一次地震的过程中,不同的桥墩处接受的地震波是不同的,不同点之间的地震波在空间是相关的。影响地震动空间相关性的主要因素有相关效应、行波效应、局部场地效应和波的衰减效应<sup>[19]</sup>。屈铁军等从理论上对地震动的空间相关性进行了研究,采用相干函数对地震动的空间相关性进行描述<sup>[20]</sup>,因此,本文采用在百米级的区域模拟效果较好的屈铁军模型,描述地震动的空间相关性,相干函数  $\rho(\omega, d)$  为

$$\rho(\omega, d) = \exp[-a(\omega)d^{b(\omega)}] \quad (10)$$

$$a(\omega) = a_1 \omega^2 + a_2$$

$$b(\omega) = b_1 \omega + b_2$$

式中:  $d$  为两点间的距离;  $\omega$  为频率;  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  分别取 0.000 016 78、0.001 219、-0.005 5、0.767 4。

#### 3.2 地震动的非平稳性

从实际的地震动记录中发现,地震动具有强度和频率非平稳的特性。本文根据相位差谱理论<sup>[21]</sup>,生成符合对数正态分布统计特性的随机相位角,进而模拟地震动的强度和频率的非平稳性。相位差谱是第  $k+1$  个相位  $\varphi_{k+1}(f)$  与第  $k$  个相位  $\varphi_k(f)$  的差值,即

$$\Delta\varphi(f) = \varphi_{k+1}(f) - \varphi_k(f) = \Delta\overline{\varphi_k}(f) + \epsilon \quad (11)$$

式中:  $\Delta\bar{\varphi}(f)$  为相位差谱均值;  $\varepsilon$  为与频率无关的零均值随机变量, 称为脉动相位差谱, 表示相位差谱在均值附近的波动。

### 3.3 空间相关多点非平稳人工地震动的合成

应用上面的相位差谱和相干函数理论, 对空间相关多点进行非平稳人工地震动合成, 具体步骤如下。

Step 1: 根据随机目标反应谱与功率谱之间的关系<sup>[3]</sup>, 目标点的自功率谱密度函数  $S_{ll}(\omega)$  为

$$S_{ll}(\omega) = \left\{ -\frac{\xi}{\pi\omega} S_l^2(\omega) / \ln \left[ -\frac{\pi}{\omega T_d} \ln(p) \right] \right\}^2 \quad (12)$$

式中:  $l$  为目标点号,  $l=1, 2, \dots, j$ ;  $j$  为目标点的个数;  $S_l(\omega)$  为目标点的加速度反应谱;  $\xi$  为阻尼比;  $p$  为反应谱幅值的概率系数, 取 0.85。

Step 2: 根据相干函数模型与目标点的自功率谱密度函数, 得到目标点中任意两点  $m, n$  之间的互功率谱密度函数  $S_{mn}(i\omega)$  为<sup>[20]</sup>

$$S_{mn}(i\omega) = \rho_{mn}(\omega) \sqrt{S_{mm}(\omega) S_{nn}(\omega)} \cdot \exp \left[ -i\omega \frac{d_{mn}}{C_H(\omega)} \right] \quad (13)$$

式中:  $\rho_{mn}(\omega)$  为  $m, n$  号点的相干函数, 由式(10)确定;  $C_H(\omega)$  为地震的水平视波速;  $d_{mn}$  为  $m, n$  号点之间的距离;  $S_{mm}(\omega), S_{nn}(\omega)$  分别为  $m, n$  号点的自功率谱密度函数;  $i$  为虚数单位。

Step 3: 根据所求出的自功率谱密度函数和互功率谱密度函数, 求取目标点之间的互功率谱矩阵  $S(i\omega)$  为<sup>[21]</sup>

$$S(i\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(i\omega) & \cdots & S_{1j}(i\omega) \\ S_{21}(i\omega) & S_{22}(\omega) & \cdots & S_{2j}(i\omega) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{j1}(i\omega) & S_{j2}(i\omega) & \cdots & S_{jj}(\omega) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$S(i\omega)$  是赫米特矩阵, 矩阵中的对称元素共轭, 如  $S_{21}(i\omega)$  与  $S_{12}(i\omega)$  共轭。

Step 4: 求相位差谱。由式(11)求出相位差谱均值  $\Delta\bar{\varphi}(f)$  和脉动相位差谱  $\varepsilon$  就可以得到相位差谱  $\Delta\varphi(f)$ , 脉动相位差谱又可由相位差谱的标准差求得<sup>[22-23]</sup>。

相位差谱的均值和标准差分别为

$$\lg |\Delta\bar{\varphi}(f)| = a_1(f) + a_2(f)M + a_3(f) \lg(R + R_0) \quad (15)$$

$$\lg(\sigma) = -1.124 + 0.089M + 0.316 \lg(R + 15) \quad (16)$$

式中:  $M$  为震级;  $R$  为震源距;  $R_0$  为常数, 取 15;  $a_1(f), a_2(f), a_3(f)$  为与频率  $f$  有关的回归系数;  $\sigma$  为相位差谱的标准差; 频率  $f$  为频率  $\omega$  的  $1/2\pi$ 。

Step 5: 由功率谱矩阵生成相关幅值和相位, 再结合相位差谱生成时频非平稳地震动时程, 并通过傅里叶逆变换生成计算反应谱。

Step 6: 将计算反应谱与随机目标反应谱拟合, 计算残差, 若精度满足要求则输出最终地震动时程的结果。

## 4 计算结果分析

### 4.1 工程概况

已知位于 II 区的一座三跨预应力连续刚构桥, 已服役时间是 40 年, 跨径为 85 m + 160 m + 85 m, 见图 1。震中距为 150 km, 震源深度为 11 km。将 2 个双薄壁桥墩作为 1、2 号目标激励点, 两者相距 160 m。桥墩 1 号点的场地土为一类, 桥墩 2 号点的场地土为二类, 一类场地剪切波速为  $1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 二类场地剪切波速为  $500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。考虑桥梁的服役期和地震动的随机性, 生成空间 1 号点和 2 号点两处桥墩的水平地震动加速度时程。

### 4.2 计算分析

#### 4.2.1 确定在役桥梁结构的自振周期和加速度反应谱

根据资料建立桥梁结构有限元模型, 对连续刚构桥进行模态分析, 得到桥梁的固有频率和自振周

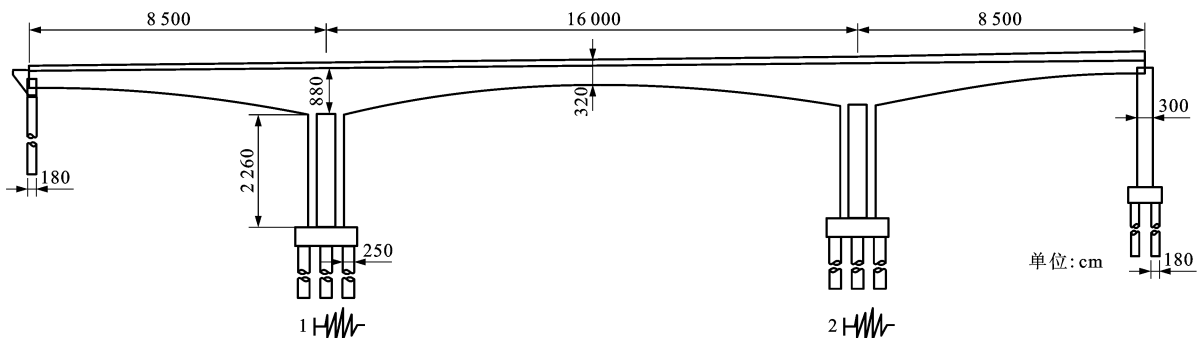


图 1 桥位总体布置

Fig. 1 Overall layout of bridge

期,见表5。表5中: $\lambda$ 为模态分析结构的特征值; $T_s$ 为结构的自振周期; $\omega_s$ 为结构的固有频率。

表5 模态分析对应的特征值和自振周期

模态	$\lambda$	$\omega_s/\text{Hz}$	$T_s/\text{s}$
1	33.1	5.75	1.09
2	281.9	16.80	0.37
3	848.7	29.10	0.22
4	1 614.5	40.20	0.16
5	2 665.1	51.60	0.12

该连续刚构桥为单孔跨径超过 150 m 的特大桥,属于 A 类,桥梁已服役 40 年,则后续服役期为 60 年。抗震设防烈度为八度,属中震烈度。按照规范中的公式<sup>[12]</sup>,计算得到服役桥梁的水平向加速度反应谱  $S$  为

$$S = \begin{cases} S_{\max}(5.5T_s + 0.45) & T_s < 0.1 \\ S_{\max} & 0.1 \leq T_s \leq T_g \\ S_{\max}(T_g/T_s) & T_s > T_g \end{cases} \quad (17)$$

$$S_{\max} = 2.25C_1C_2C_3A$$

式中: $T_g$ 为结构所处的场地特征周期,依据桥梁结构的基本设计资料,由桥梁结构所在的位置,根据《中国地震动反应谱特征周期区划图》上查取值为 0.45 s; $T_s$ 由表 5 可查得,桥梁的第一自振周期是 1.09 s,大于特征周期; $S_{\max}$ 为水平向设计加速度反应谱最大值; $C_1$ 为抗震重要性系数,取 1.3; $C_2$ 为场地系数,一类场地取 0.9,二类场地取 1.0; $C_3$ 为阻尼调整系数,取 1.0; $A$ 由表 4 查得,等于  $1.3715 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。分别将各值代入式(17)中,得到 1 号点和 2 号点反应谱最大值分别为  $3.6104$ 、 $4.0112 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,1、2 号点水平向加速度反应谱曲线见图 2、3。

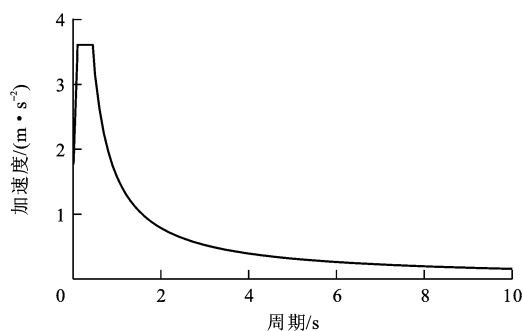


图2 1号点目标反应谱

Fig. 2 Target response spectrum of point No. 1

#### 4.2.2 反应谱的随机化

由目标反应谱和式(9),1、2号点可分别生成多组随机反应谱。具体生成方法是先确定若干固有周期点,然后依次对各周期点产生服从泊松分布的相

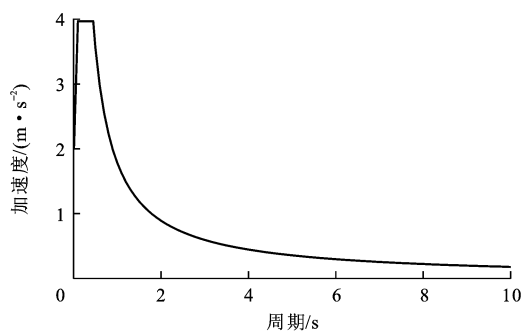


图3 2号点目标反应谱

Fig. 3 Target response spectrum of point No. 2

互独立的随机数  $L_i$ ,令每一个随机数  $L_i$  分别等于结构最大反应的分布函数  $F(y_{mi})$ ,再求出每一个随机数  $L_i$  对应的最大反应  $y_{mi}$ ,连接每一个  $y_{mi}$  值即可生成一条随机反应谱,1、2号点的随机目标反应谱见图 4、5。

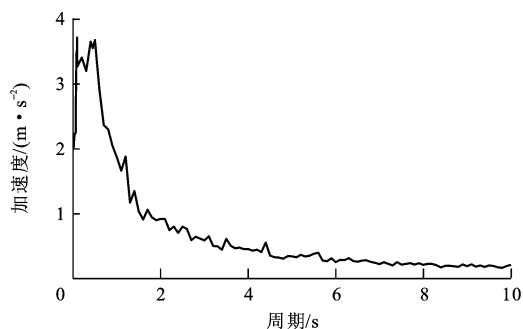


图4 1号点随机目标反应谱

Fig. 4 Random target response spectrum of point No. 1

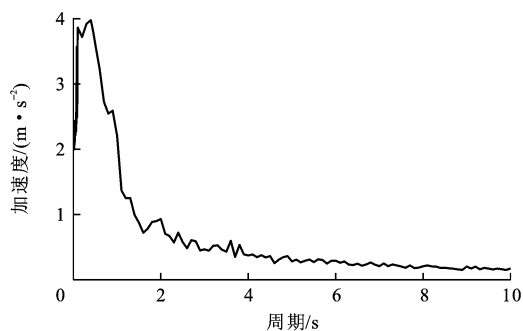


图5 2号点随机目标反应谱

Fig. 5 Random target response spectrum of point No. 2

以 1 号点为例,随机生成 30 条随机反应谱,见图 6。根据式(5)~(7),统计 30 条随机反应谱的均值和变异系数,统计值与给定值在主要周期处的对比见表 6。从表 6 可知,1 号点的 30 条随机反应谱的统计均值和方差与用公式计算出的均值和方差基本一致,变异系数最大差值 0.064,因此,生成的随机反应谱满足精度要求,是合理的。

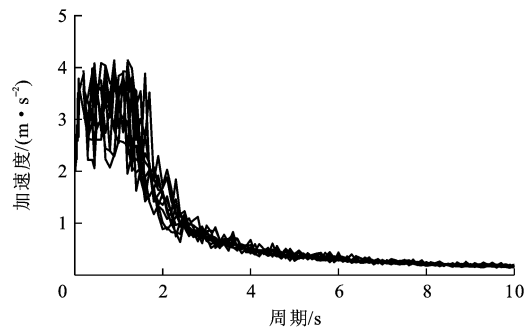


图 6 1 号点的 30 条随机反应谱

Fig. 6 Thirty random response spectrums of point No. 1

表 6 1 号点随机反应谱均值和变异系数

Tab. 6 Mean values and variable coefficients of random response spectrums for point No. 1

周期/s	反应谱		变异系数	
	给定均值/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	统计均值/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	给定值	统计值
0.0	2.000 0	1.902 4	0.081	0.080
0.1	3.610 4	3.509 6	0.092	0.091
0.4	3.610 4	3.624 1	0.125	0.138
1.0	1.579 8	1.644 6	0.158	0.147
2.0	0.920 1	0.887 5	0.191	0.187
3.0	0.561 3	0.525 0	0.224	0.218
4.0	0.411 5	0.393 7	0.231	0.247
6.0	0.257 6	0.262 5	0.273	0.281
8.0	0.204 9	0.196 9	0.412	0.348
10.0	0.179 0	0.182 0	0.436	0.406

4.2.3 人工模拟地震动

应用 MATLAB 程序,生成空间相关的 1、2 号点处的人工地震动时程。具体步骤如下,生成的结果见图 7~12。

Step 1:根据式(12)得到 1、2 号点的自功率谱密度函数  $S_{11}(\omega)$ 和  $S_{22}(\omega)$ 。

Step 2:已知 1、2 号点之间的距离为 160 m, 1、2 号点的地震传播速度分别为  $1\,500$ 、 $500\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,

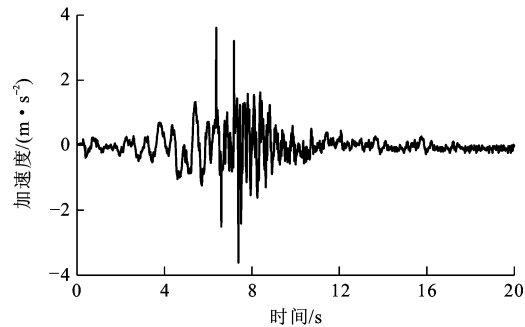


图 7 1 号点地震加速度时程

Fig. 7 Time history of seismic acceleration for point No. 1

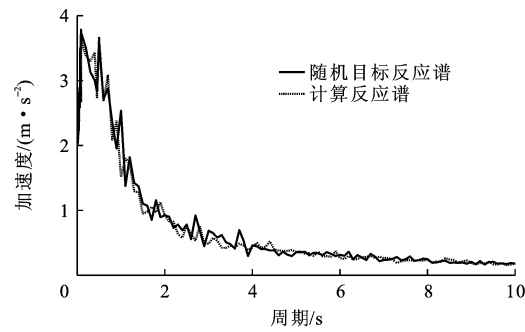


图 8 1 号点反应谱拟合

Fig. 8 Response spectrum fitting of point No. 1

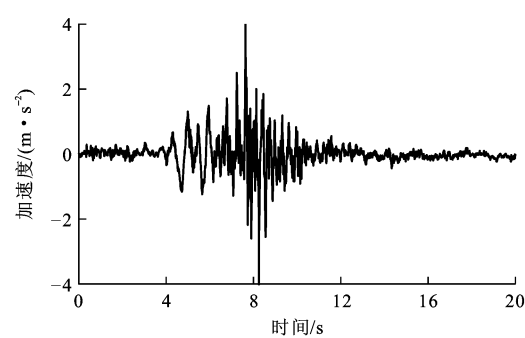


图 9 2 号点地震加速度时程

Fig. 9 Time history of seismic acceleration for point No. 2

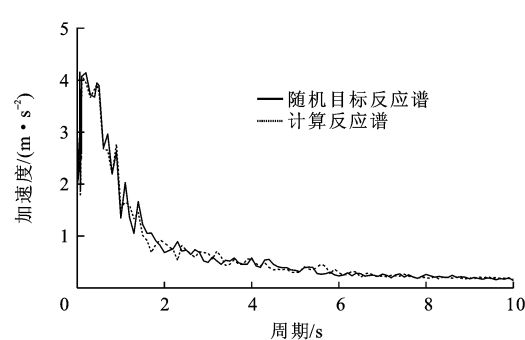


图 10 2 号点反应谱拟合

Fig. 10 Response spectrum fitting of point No. 2

由式(13)求得 1、2 号点的互功率谱密度函数  $S_{12}(i\omega)$ 。

Step 3:根据式(14)求得桥位处 1、2 号点的互功率谱矩阵  $S(i\omega)$ 。

Step 4:根据式(15)、(16)求相位差谱  $\Delta\varphi(f)$ , 并得到计算反应谱。

Step 5:将计算反应谱与随机目标反应谱拟合, 得到最终的人工地震动时程。

计算反应谱与随机目标反应谱的拟合程度,可以用拟合优度指标  $R'$ 表示, $R'$ 取值在 $[0,1]$ 之间, $R'$ 值越接近 1,说明曲线的拟合程度越好,见表 7。

由 1、2 号点的反应谱拟合曲线图 8、10 可知,计算反应谱与随机目标反应谱拟合较好,表 7 中,1、2 号点拟合优度值分别为 0.82、0.81,均接近 1.00,

表 7 计算反应谱与随机目标反应谱的拟合优度

Tab. 7 Goodnesses of fit between calculating response spectrum and random target response spectrum

周期/s		0.0	0.1	0.4	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	10.0
1 号点	随机目标反应谱	2.00	3.71	3.00	2.54	0.92	0.67	0.46	0.32	0.25	0.14
	计算反应谱	1.97	3.58	3.43	1.52	0.87	0.58	0.43	0.27	0.24	0.16
	拟合优度	0.82									
2 号点	随机目标反应谱	2.00	4.07	3.97	1.38	0.68	0.49	0.57	0.32	0.26	0.18
	计算反应谱	1.96	3.95	3.98	1.43	0.72	0.53	0.55	0.29	0.21	0.18
	拟合优度	0.81									

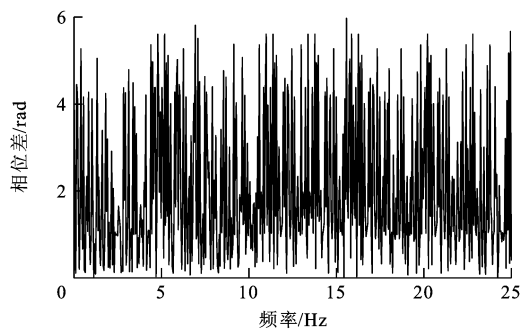


图 11 相位差谱

Fig. 11 Phase difference spectrum

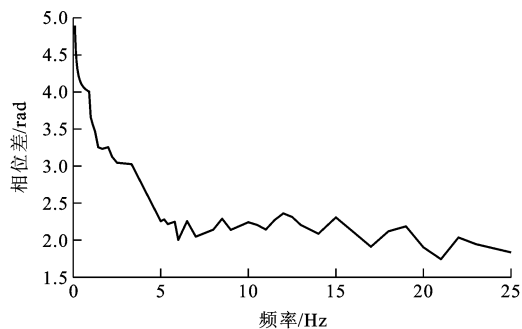


图 12 相位差谱均值

Fig. 12 Mean value of phase difference spectrum

所以 1、2 号点的地震加速度时程符合精度要求。1、2 号点的加速度时程不仅反映了桥梁的已服役期,而且更加体现了地震动作用的随机性。

## 5 结 语

(1)为符合实际抗震要求,将目前公路桥梁抗震规范中的两级设防标准扩展为三级设防标准,分别是多遇地震(86.2%)、中震(19.0%)、罕遇地震(3.9%)。应用等超越概率的方法和地震加速度危险性曲线公式,得到服役桥梁结构不同后续服役期对应的地震峰值加速度和反应谱。

(2)应用概率理论随机化反应谱,得到的随机目标反应谱可以同时反映均值和方差,使人工模拟地震动更好地反映了实际地震动的随机性。

(3)通过折减地震作用和随机化反应谱,再结合相干函数与相位差谱理论合成的人工地震动满足精度要求,更加符合服役大跨度桥梁结构遭遇的真实地震动的特征,对桥梁结构的地震动时程分析具有十分重要的意义。

(4)考虑在役桥梁结构材料的损伤,如何建立损伤结构的有限元模型是下一步研究的重点内容。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] JALAYER F, IERVOLINO I, MANFREDI G. Structural modeling uncertainties and their influence on seismic assessment of existing RC structures[J]. Structural Safety, 2010, 32(3): 220-228.
- [2] BI K, HAO H, CHOUW N. Influence of ground motion spatial variation, site condition and SSI on the required separation distances of bridge structures to avoid seismic pounding[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2011, 40(9): 1027-1043.
- [3] JALAYER F, BECK J L. Effects of two alternative representations of ground-motion uncertainty on probabilistic seismic demand assessment of structures[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2008, 37(1): 61-79.
- [4] ZANARDO G, HAO H, MODENA C. Seismic response of multi-span simply supported bridges to a spatially varying earthquake ground motion[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(6): 1325-1345.
- [5] 赵凤新,张郁山. 人造地震动反应谱拟合的窄带时程叠加法[J]. 工程力学, 2007, 24(4): 87-91, 45.  
ZHAO Feng-xin, ZHANG Yu-shan. Narrowband-time-history's superimposing method of generating response-spectrum-compatible accelerogram[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(4): 87-91, 45. (in Chinese)
- [6] 杨庆山,姜海鹏. 基于相位差谱的时-频非平稳人造地震动的反应谱拟合[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(1): 32-38.  
YANG Qing-shan, JIANG Hai-peng. Generation of response-spectrum-compatible ground motions based on phase-difference spectrum[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(1): 32-38. (in Chinese)
- [7] 田玉基,杨庆山. 基于相位差谱的空间相关非平稳地震动场的



- 模拟[J]. 计算力学学报, 2010, 27(5): 828-833.
- TIAN Yu-ji, YANG Qing-shan. Phase-difference-based simulation of spatial correlated and non-stationary seismic ground motions[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(5): 828-833. (in Chinese)
- [8] 徐国栋, 周锡元, 史培军. 基于功率谱的三参量人工地震动合成[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 111-118.
- XU Guo-dong, ZHOU Xi-yuan, SHI Pei-jun. Artificial ground motion using three statistics based on power spectrum[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9): 111-118. (in Chinese)
- [9] TSANG H H, SU R K L, LAM N T K, et al. Rapid assessment of seismic demand in existing building structures[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2009, 18(4): 427-439.
- [10] 孙 彬, 牛荻涛, 董振平. 在役结构抗震评估地震作用取值研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2003, 35(4): 312-316.
- SUN Bin, NIU Di-tao, DONG Zhen-ping. Research on earthquake action for seismic assessment of existing structures[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2003, 35(4): 312-316. (in Chinese)
- [11] JTG D60—2004, 公路桥涵设计通用规范[S].
- JTG D60—2004, general code for design of highway bridges and culverts[S]. (in Chinese)
- [12] JTG/T B02-01—2008, 公路桥梁抗震设计细则[S].
- JTG/T B02-01—2008, guidelines for seismic design of highway bridges[S]. (in Chinese)
- [13] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB 50011—2010, code for seismic design of buildings[S]. (in Chinese)
- [14] 谢礼立, 张晓志, 周雍年. 论工程抗震设防标准[J]. 地震工程与工程振动, 1996, 16(1): 1-18.
- XIE Li-li, ZHANG Xiao-zhi, ZHOU Yong-nian. On the design earthquake level for earthquake resistant works[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(1): 1-18. (in Chinese)
- [15] CHOUW N, HAO H. Estimation of required seating length of bridge girders under non-uniform ground excitation and different ground conditions[J]. Journal of Applied Mechanics, 2005, 8: 709-718.
- [16] 洪 峰, 谢礼立. 工程结构抗震设计中震、中震和大震的确定方法[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(2): 1-6.
- HONG Feng, XIE Li-li. Method of determining minor, moderate and major earthquake in earthquake-resistant design of engineering structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(2): 1-6. (in Chinese)
- [17] 张 宁. 移动车辆荷载作用下桥梁竖向随机振动分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- ZHANG Ning. Stochastic vertical analysis of bridges under moving vehicle loads [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [18] 刘庆林, 傅学怡, 杨先桥. 基于粘性阻尼假定的反应谱 CCQC 法研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(4): 55-62.
- LIU Qing-lin, FU Xue-yi, YANG Xian-qiao. Research on response spectrum CCQC method based on viscous damping assumption[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(4): 55-62. (in Chinese)
- [19] CHOUW N, HAO H. Study of SSI and non-uniform ground motion effect on pounding between bridge girders[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25 (7/8/9/10): 717-728.
- [20] 屈铁军, 王前信. 空间相关的多点地震动合成(1)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)
- [21] 李建波, 陈健云, 高 冲. 基于相位差谱的多点激励人工波数值生成算法研究[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(4): 558-563.
- LI Jian-bo, CHEN Jian-yun, GAO Chong. Research on numerical generation algorithms of multi-support excitation artificial seismic waves based on phase difference spectrum[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(4): 558-563. (in Chinese)
- [22] BI K, HAO H, CHOUW N. Required separation distance between decks and at abutments of a bridge crossing a canyon site to avoid seismic pounding[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2010, 39(3): 303-323.
- [23] CHOUW N, HAO H. Effect of simultaneous spatial near-source ground excitation and soil on the pounding response of bridge girders[J]. Journal of Applied Mechanics, 2003, 6: 779-788.