

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2015.04.001

空间相关的多点多维地震动合成方法

雷虎军^{1,2}

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 基于谱方法的随机场理论,借助功率谱密度函数来描述地震动随机场,同时考虑不同点、不同向地震动分量间的相关性,分别采用 Clough-Penzien 模型和屈铁军-王君杰相干模型来描述平稳自功率谱和平稳互功率谱,建立了空间相关的多点多维地震动合成方法。采用 Matlab R2010b 编制生成程序,并以某 445 m 大跨度拱桥场地条件为例,生成空间相关的多点多维地震动时域样本,并将该时域样本的功率谱密度函数与目标功率谱密度函数进行对比。结果表明:模拟结果与目标值吻合较好,按照上述方法生成的多点多维地震时域样本满足要求。

关键词: 谱方法; 多点多维地震动; 功率谱密度函数; 空间相关性

中图分类号: U24;TB123

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2015)04-0307-06

A method to generate the multi-support and multi-dimension earthquake ground motion

Lei Hujun^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informatization in Civil Engineering, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A method to generate multi-support and multi-dimension earthquake ground motion was proposed. In this method, the random field of earthquake ground motion was described as the matrix of power spectral density function, and the correlations of earthquake wave components among different points and different directions were considered. The stationary auto-power spectrum and cross-power spectrum were described as Clough-Penzien model and Qu Tiequn-Wang Qunjie coherent model respectively. The simulated analysis program was compiled by Matlab R2010b. As an example, an arch bridge with a span of 445 m was modelled, the multi-support and multi-dimension earthquake data and the power spectrum density function of which were generated and compared. The results show that the simulation results accord with the target and the generated earthquake ground motions by this method meet the requirements.

Keywords: spectral method; multi-support and multi-dimension earthquake ground motion; power spectral density function; spatial correlation

强震作用下结构将进入弹塑性状态,求解该非线性系统时程分析仍将是主流手段,合理的地震动输入是确保时程分析结果正确、可靠的关键。因此,在研究强震作用下各种结构的非线性行为

时首先要确定作为输入的地震动时间历程。对于大跨结构所在的工程场地,地震动的空间变异性突出,如何获取满足工程场地要求的空间相关地震动时域样本至关重要。近年来,随着众多强震

收稿日期: 2015-06-17

基金项目: 福建工程学院校科研启动基金项目(GY-Z14077)

作者简介: 雷虎军(1986-),男,四川渠县人,讲师,博士,研究方向:桥梁结构抗震及车致振动。

观测台网的建立,收集了大量的空间相关地震加速度记录,然而,有限场地的地震加速度记录仍难以满足所有工程结构抗震分析的需求。因此,建立一套完善的空间相关地震动合成方法非常必要。

国内外学者针对空间相关地震动的合成方法进行了广泛研究。Hao^[1]采用基于谱方法的随机场理论,在合成单点地震动的基础上提出了多点地震动的合成方法,但他在生成某点地震动时只考虑与其前各点之间的相关性,而未考虑与其后各点之间的相关性。屈铁军^[2-3]对 Hao 的方法进行了改进,在生成某点地震动时同时考虑与其余各点之间的相关性。姜海鹏^[4]在 Hao 的基础上将随机场理论与相位差谱结合,提出了一种直接生成时-频非平稳特性的空间相关地震动合成方法。董汝博^[5]根据地震波的传播特点,对屈铁军的方法进行了修改,通过修正随机相位角,使生成的多点地震动在局部场地上具有收敛性,并且分别给出了根据已知相位差谱和未知相位差谱合成空间相关地震动的方法。Ayman^[6]基于单点地震动合成的不同频率下余弦函数求和法,引入时滞和相关相位角,提出了一种与给定地震记录谱特征相似的多点地震动合成方法。上述研究成果建立了空间相关多点地震动的合成方法,但大部分只考虑了不同点同一分量间的相关性,而未考虑同一点不同分量间的相关性以及不同点不同分量间的相关性。

本文基于谱方法的随机场理论,借助功率谱密度函数来描述地震动随机场,建立了更为一般的空间相关多点多维地震动合成方法。

1 多点多维随机地震动场的模拟

一维多点加速度功率谱密度函数矩阵可表达为

$$S(i\omega_k) = \begin{bmatrix} S_{11}(i\omega_k) & S_{12}(i\omega_k) & \cdots \\ S_{21}(i\omega_k) & S_{22}(i\omega_k) & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{N1}(i\omega_k) & S_{N2}(i\omega_k) & \cdots \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, N 为支撑节点总数; $S_{mm}(i\omega_k)$ ($m = 1 \sim N$) 为支撑节点的自功率谱密度函数; $S_{mn}(i\omega_k)$ ($m = 1 \sim N, n = 1 \sim N$, 且 $m \neq n$) 为不同支撑点间的互功率谱密度函数; ω_k 为频率离散值; k 为频率离散点序号; i 为虚数单位。

当考虑多维地震各分量间的相关性时,将式(1)中每一项按下式扩展

$$S_{mm}(i\omega_k) = \begin{bmatrix} S_{mnxx}(i\omega_k) & S_{mnxy}(i\omega_k) & \cdots \\ S_{mnxy}(i\omega_k) & S_{mnyy}(i\omega_k) & \cdots \\ S_{mnzx}(i\omega_k) & S_{mnzy}(i\omega_k) & \cdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, x 代表顺桥向分量, y 代表横桥向分量, z 代表竖向分量; $S_{mnxx}(i\omega_k)$ 、 $S_{mnyy}(i\omega_k)$ 、 $S_{mnzz}(i\omega_k)$ 分别为第 m 点与第 n 点顺桥向、横桥向和竖向的自功率谱密度函数,且 $m = 1 \sim N, n = 1 \sim N$; 其余元素为第 m 点与第 n 点不同向间的互功率谱密度函数。

关于地震动各分量间相关性的研究,已有大量研究成果。鉴于地震动各分量相干系数取值的复杂性,本文采用松岛丰的假设,则

$$\begin{cases} S_{mnxx}(i\omega_k) = S_{mnyy}(i\omega_k) = S_{mnxy}(i\omega_k) = S_{mnyx}(i\omega_k) \\ S_{mnxz}(i\omega_k) = S_{mnzx}(i\omega_k) = 0.6\sqrt{S_{mnxx}(i\omega_k)S_{mnzz}(i\omega_k)} \\ S_{mnyz}(i\omega_k) = S_{mnzy}(i\omega_k) = 0.6\sqrt{S_{mnyy}(i\omega_k)S_{mnzz}(i\omega_k)} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,只要确定了一维平稳自功率谱模型和一维平稳互功率谱模型即可建立起多点多维随机地震动场。以下分别介绍本文采用的自功率谱模型和互功率谱模型以及相应的参数取值。

1.1 自功率谱模型

Housner^[7]最早提出了地震加速度的平稳白噪声模型,该模型仅从纯数学的角度考虑,无法反映地震动的物理本质。之后,地震动通常被视为过滤白噪声过程。日本学者 Kanai - Tajimi^[8]将地震时的基岩加速度视为零均值白噪声过程,而地表相当于一个滤波器,提出了著名的 K - T 谱, K - T 谱为白噪声过程的一次滤波形式,它能较好地反映均匀地基对地震波的滤波作用。由于 K - T 谱含有低频分量和高频分量,一些学者在 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。胡聿贤^[9]采用一阶高通滤波器、Clough 等^[10]采用二阶高通滤波器对 K - T 谱进行修正,以消除其零频分量。本文综合考虑各种地震动随机模型的特点,选用可考虑低频分量的 Clough - Penzien 模型(简称 C - P 谱)作为目标功率谱,即

$$S_{C-P}(\omega) = S_{K-T}(\omega) \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_f^2\omega_f^2\omega^2} \quad (4)$$

式中, ω_f 和 ξ_f 分别为控制地震动低频分量的地面过滤参数。不同场地类别的 C-P 谱参数取值参考文献[11]。

1.2 互功率谱模型

空间任意两点 m, n 的互功率谱可表达为

$$S_{mn}(i\omega) = \sqrt{S_{mn}(i\omega)S_{nn}(i\omega)} \rho_{mn}(d_{mn}, \omega) e^{-i\omega d_{mn}/v_a(\omega)} \quad (5)$$

式中, $S_{mn}(i\omega)$ 、 $S_{nn}(i\omega)$ 分别为第 m 点和第 n 点的自功率谱, 表示支撑点 m 和 n 的局部场地效应; $\rho_{mn}(d_{mn}, \omega)$ 为相干函数, 反映场地的部分相干效应; $\exp(i\omega d_{mn}/v_a(\omega))$ 为相干函数的幅角, 体现行波效应; d_{mn} 为连接两点的矢量在地震波入射方向上的投影; $v_a(\omega)$ 为视波速。

(1) 相干函数

相干函数是描述空间两点地震动相关程度的量, 函数值介于 0 与 1 之间, 值越大, 表明相关程度越强。关于相干函数的研究, 已有不少研究成果, 但由于不同学者针对的台阵记录不同, 不同模型之间的差别极大。为寻求一个适用范围较广的相干函数模型, 屈铁军、王君杰等借鉴我国抗震设计规范中制定设计反应谱的方法, 取各模型在各次地震中相干值的平均值, 并通过最小二乘法拟合, 提出了著名的屈铁军-王君杰相干模型^[12]。由于该模型综合了其余各常用相干模型在各次地震中的相干值, 因而具有较高的工程应用价值, 本文的相干函数即采用该模型, 即:

$$\rho_{mn}(d_{mn}, \omega) = e^{-a(\omega)d_{mn}b(\omega)} \quad (6)$$

式中, $a(\omega)$ 和 $b(\omega)$ 是随频率变化的两个参数, $a(\omega) = a_1\omega^2 + a_2$, $b(\omega) = b_1\omega^2 + b_2$, $a_1 = 0.000\ 016\ 78$, $a_2 = 0.001\ 219$, $b_1 = -0.005\ 5$, $b_2 = 0.767\ 4$ 。

(2) 视波速

地震波的视波速是研究地震动空间变异性的一个重要参数之一。一些学者根据密集台阵记录, 采用 F-K 法(频率-波数谱分析)来估计视波速, 但结果的离散性很大。屈铁军、王君杰等基于台湾 SMART-I 台阵的 39、43、45 次地震动记录, 通过带通滤波器对 m, n 两点的地震动加速度进行带通滤波获得窄带信号, 然后求出二者的相关函数, 再将该相关函数的最大值所对应的时滞作为该窄带信号从 m 点传播至 n 点的时间, 从而计算出带宽中心点频率的视波速, 并得到了如下拟合公式^[12]。

$$v_a(\omega) = A + B \ln(\omega/2\pi) \quad (7)$$

式中, A, B 为拟合参数。由于地震波视波速的复杂性, 本文取常数进行多点多维地震动的模拟, 其值参考《铁路工程抗震设计规范》(2009 年版)(GB 50111-2006)中不同场地类别的等效剪切波速。

2 多点多维地震动时域样本的合成与校正

2.1 合成平稳多点多维地震动时域样本

采用 Cholesky 方法将 $(3N \times 3N)$ 维的多点多维功率谱矩阵 $S(i\omega_k)$ 分解为下三角矩阵与上三角复数共轭矩阵的乘积

$$S(i\omega_k) = \begin{bmatrix} l_{11}(\omega_k) & 0 & \cdots & 0 \\ l_{21}(i\omega_k) & l_{22}(\omega_k) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{11}(i\omega_k) & l_{12}(i\omega_k) & \cdots & l_{TT}(\omega_k) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_{11}(\omega_k) & l_{21}^*(i\omega_k) & \cdots & l_{T1}^*(i\omega_k) \\ 0 & l_{22}(\omega_k) & \cdots & l_{T2}^*(i\omega_k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & l_{TT}(\omega_k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $T = 3N$, 表示多点多维地震波的总条数; “*”表示对复数求共轭; $l_{ij}(\omega_k)$ ($i, j = 1 \sim T$) 的表达式参考文献[8]。

根据 $S(i\omega_k)$ 的分解项, 即可求出频率分量 ω_k 下的幅值 $A_{jr}(\omega_k)$ 和相位角 $\theta_{jr}(\omega_k)$, 当求得所有频率分量下的幅值和相位角之后, 即可将相位和幅值表达的余弦函数双求和合成 T 条空间相关的平稳加速度时程

$$\begin{cases} a_1(t) = \sum_{p=1}^T \sum_{k=0}^{M-1} A_{1p}(\omega_k) \cos[\omega_k t + \theta_{1p}(\omega_k) + \varphi_{pk}] \\ a_2(t) = \sum_{p=1}^T \sum_{k=0}^{M-1} A_{2p}(\omega_k) \cos[\omega_k t + \theta_{2p}(\omega_k) + \varphi_{pk}] \\ \vdots \\ a_T(t) = \sum_{p=1}^T \sum_{k=0}^{M-1} A_{Tp}(\omega_k) \cos[\omega_k t + \theta_{Tp}(\omega_k) + \varphi_{pk}] \end{cases} \quad (9)$$

式中, M 为频率离散点个数; φ_{pk} 为 $[0, 2\pi]$ 之间均匀分布的随机数。

2.2 合成非平稳多点多维地震动时域样本

公式(9)合成的地震动为平稳地震动, 这与实际地震加速度的非平稳特性不符, 需合成非平

稳的多点多维地震动。实际地震记录在地震发生时刻和结束时刻地震动的强度均为零,则将公式(10)表达的平稳地震动乘以各自的包络函数即可得到多点多维非平稳地震加速度时程

$$a_j(t) = f_j(t) \sum_{p=1}^T \sum_{k=0}^{M-1} A_{Tp}(\omega_k) \cos[\omega_k t + \theta_{Tp}(\omega_k) + \varphi_{pk}]$$

(10)

式中, $j = 1 \sim T, f_j(t) (j = 1, 2, \dots, T)$ 为第 j 条平稳地震波的强度包络函数。其中,各点同方向的强度包络函数可认为是相等的,而不同方向的强度包络函数会有一些的差异。如果忽略这一差异,一般采用如下形式

$$f(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & t < t_1 \\ 1 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ e^{-c(t-t_2)} & t > t_2 \end{cases}$$

(11)

式中, $f(t)$ 为统一的强度包络函数, t_1 为地震动平稳段开始的时刻; t_2 为地震动平稳段结束的时刻; c 为地震动衰减系数。参考文献[8],不同场地类别下 t_1 、 t_2 和 c 的取值见表 1。

表 1 强度包络函数参数取值

Tab.1 Parameters value of strength envelope function

| 场地类别 | t_1/s | t_2/s | c/s^{-1} |
|------|---------|---------|------------|
| I | 0.5 | 5.5 | 0.45 |
| II | 0.8 | 7.0 | 0.35 |
| III | 1.2 | 9.0 | 0.25 |
| IV | 1.6 | 12.0 | 0.15 |

2.3 地震动时域样本的校正

采用上述方法可以得到满足要求的地震加速度,但在合成过程中不可避免地会引入地震地面运动的长周期成分,使通过地震加速度直接积分得到的速度和位移时程出现“零线漂移”问题,即地震终止时刻会有残留速度和残留位移。而对于大多数结构,其工程场地通常远离震中,地震终止时刻支撑点的绝对速度和绝对位移应为零,因此,带有残留分量的速度和位移时程不能直接用于抗震分析,需对加速度进行校正。关于地震动时域样本的校正方法,国内外学者进行了广泛研究。其中,Wilson 教授^[13]将地震加速度时程看作是系列脉冲的叠加,通过构造线性校正函数对加速度记录分两个时间段校正,以实现地震波终止时刻的零速度和零位移。该方法思路明确,且能够保持原地震加速度的峰值、频谱和持时等特性不变,

因而得到了广泛应用。本文即采用该方法对合成的多点多维地震动加速度时程进行校正,主要步骤如下。

- 1) 在地震加速度开始前和结束后增加零值;
- 2) 计算地震加速度在结尾处的位移增量,并采用线性函数对从零时刻到 t_L 时刻内的加速度值进行修正;
- 3) 计算地震加速度在结尾处的速度增量,并采用线性函数对从 t_M 时刻到结束时刻内的加速度值进行修正;
- 4) 判断终点时刻的位移和速度值是否满足要求,否则,重复 2、3 步骤。

根据上述方法,采用 Matlab R2010b 编制了多点多维地震时域样本生成程序,程序流程见图 1。

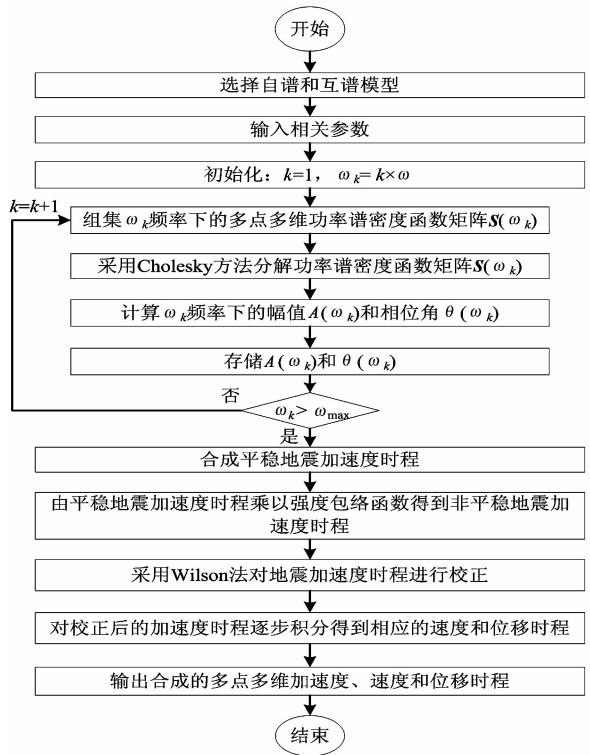


图 1 多点地震动生成程序流程图
Fig1 Process flowchart of generating multi-support and multi-dimensional earthquake motion

3 合成实例

以某 445 m 上承式劲性骨架混凝土拱桥方案为例,该桥抗震设防烈度为 7 度,位于 I 类场地,设计地震分组为第 3 组。模拟过程中,以 7 度设计地震为合成目标,并假设地震波沿桥梁纵向从左侧拱脚支撑点 1 向右侧拱脚支撑点 2 传播,主要模拟参数见表 2。表中, ω_{gh} 、 ζ_{gh} 、 ω_{fh} 、 ζ_{fh} 和 ω_{gv} 、

表2 地震动合成参数

Tab.2 Parameters of earthquake ground motion simulation

| | | | | | | | | |
|----|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------|-----------------|----------------------------|----------------------|
| 参数 | ω_{gh} | ζ_{gh} | ω_{fh} | ζ_{fh} | S_{01} | S_{v1}/S_{01} | Δ_t | N |
| 值 | 21.17 | 0.756 | 0.4 | 0.467 | 13.76 | 0.281 | 0.02 | 1 000 |
| 参数 | ω_{gv}/ω_{gh} | ζ_{gv}/ζ_{gh} | ω_{fv}/ω_{fh} | ζ_{fv}/ζ_{fh} | S_{02} | S_{v2}/S_{02} | ω_{max}/ω_{gh} | $v/(m \cdot s^{-1})$ |
| 值 | 1.58 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 8.242 | 0.281 | 10.0 | 2 000 |
| 参数 | t_1/s | t_2/s | c | a_1 | a_2 | b_1 | b_2 | d/m |
| 值 | 0.5 | 5.5 | 0.45 | 0.000 016 8 | 0.001 219 | -0.005 5 | 0.767 4 | 445 |

ζ_{gv} 、 ω_{fv} 、 ζ_{fv} 分别为支撑点 1 和 2 的水平与竖向自功率谱参数； S_{01} 、 S_{02} 分别为支撑点 1 和 2 的水平向谱强度； S_{v1} 、 S_{v2} 分别为支撑点 1 和 2 的竖向谱强度； v 为视波速； Δt 为记录时间间隔； N 为生成点总数； ω_{max} 为频率上限。

采用编制的 Matlab 程序生成了左、右侧拱脚处考虑空间变异性的多点多维地震动时域样本,水平向加速度、速度和位移时程样本分别见图 2~4。

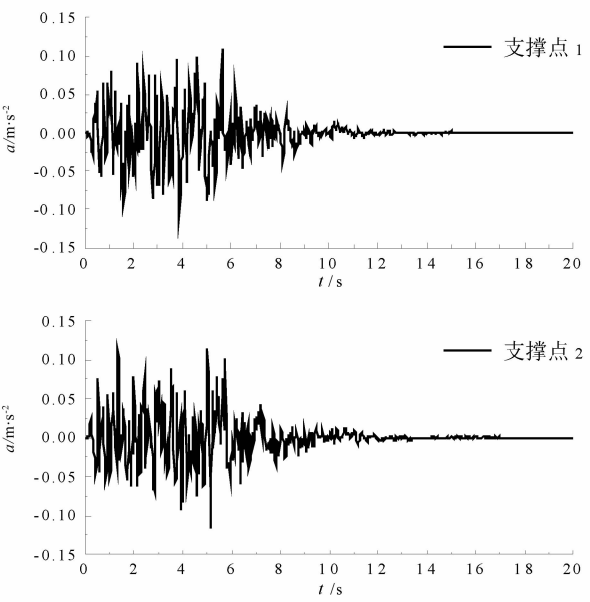


图2 加速度时程曲线

Fig.2 Acceleration time-history curve

将支撑点 1 和 2 的地震加速度功率谱与目标功率谱进行对比,见图 5。由图可得,模拟结果与目标值吻合较好,按照上述方法生成的多点多维地震动时域样本满足要求。

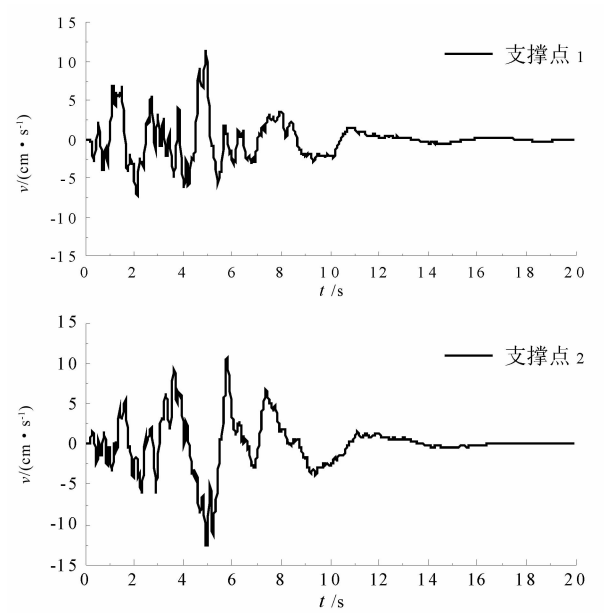


图3 速度时程曲线

Fig.3 Velocity time-history curve

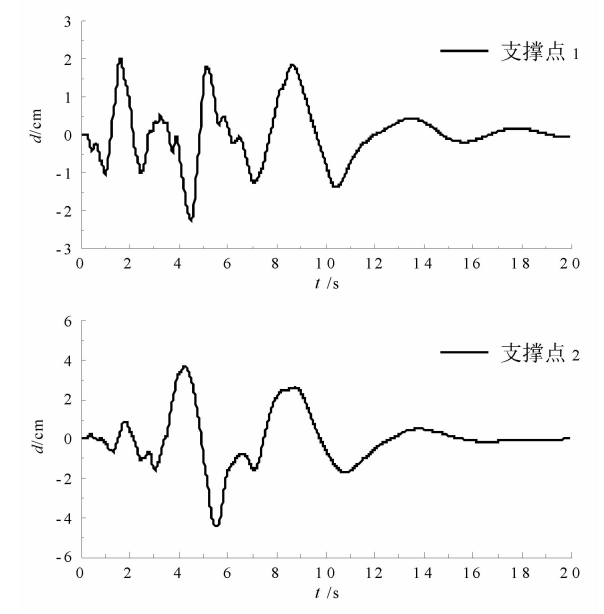


图4 位移时程曲线

Fig.4 Displacement time-history curve

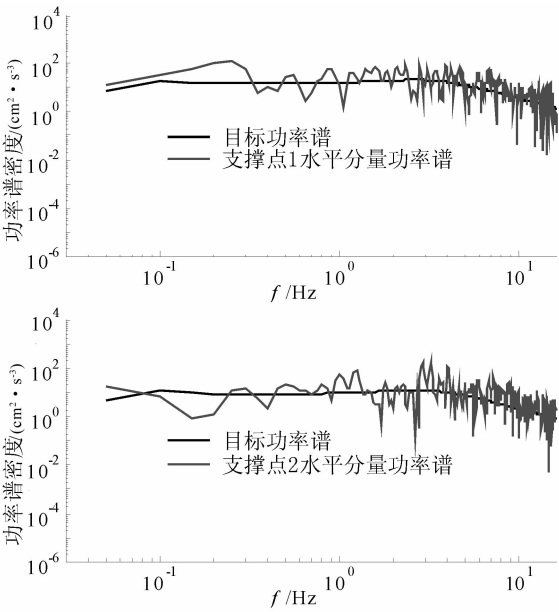


图 5 地震功率谱与目标功率谱的对比曲线

Fig.5 Earthquake ground motion power spectrum vs target power spectrum

4 结论

基于谱方法的随机场理论,借助功率谱密度函数来描述地震动随机场,同时考虑不同点、不同向地震动分量间的相关性,分别采用 Clough-Penzien 模型和屈铁军-王君杰相干模型来描述平稳自功率谱和平稳互功率谱,建立了空间相关的多点多维地震动合成方法。采用 Matlab R2010b 编制了生成程序,并以某 445 m 大跨度拱桥场地条件为例,生成了空间相关的多点多维地震动时域样本,并将该时域样本的功率谱密度函数与目标功率谱密度函数进行了对比。结果表明,模拟结果与目标值吻合较好,按照上述方法生成的多点多维地震时域样本可以满足工程结构抗震的要求。

参考文献:

[1] Hao H, 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(3): 293 - 310.

[2] 屈铁军,王前信. 空间相关的多点地震动合成(I)基本公式[J]. 地震工程与工程振动,1998,18(1):8 - 15.

[3] 屈铁军,王前信. 空间相关的多点地震动合成(II)合成实例[J]. 地震工程与工程振动,1998,18(2):25 - 32.

[4] 姜海鹏,王航,杨庆山. 空间变异地震作用下大型连续刚构桥的延性性能分析[J]. 铁道工程学报,2001(2):37 - 45.

[5] 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.

[6] Shama A A. Simplified procedure for simulating spatially correlated earthquake ground motions[J]. Engineering Structures, 2007,29:248 - 258.

[7] Housner G W, Jennings P C. Generation of artificial earthquakes[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division,1964, 90(EM1):113 - 150.

[8] 欧进萍,王光远. 结构随机振动[M]. 北京:高等教育出版社,1998.

[9] 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.

[10] Clough R W, Penzien J. Dynamics of structures [M]. New York: McGraw-Hill Book Co,1975.

[11] 潘晓东. 非平稳随机地震下堤坝非线性有效应力动力响应可靠度分析[D]. 杭州:浙江大学,2004.

[12] 屈铁军,王君杰,王前信. 空间变化的地震功率谱的实用模型[J]. 地震学报,1996,18(1):55 - 62.

[13] Wilson E L. Three dimensional static and dynamic analysis of structure [M]. 3rd edi. California: Computers and Structures, Inc,2002:392 - 399.

(责任编辑:陈雯)