

陈先明. 随机振动下建筑工程抗震参数的测试与实验分析[J]. 华南地震, 2019, 39 (1): 86-91. [CHEN Xianming. Testing and Experimental Analysis of Seismic Parameters of Building Engineering under Random Vibration[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(1): 86-91]

## 随机振动下建筑工程抗震参数的测试与实验分析

陈先明

(青海民族大学, 西宁 810005)

**摘要:** 随机振动对建筑工程的破坏严重, 随机性振动的破坏程度很难量化, 抗震参数测试较为困难, 给相关建筑工程的稳定性带来极大威胁。研究随机振动下建筑工程抗震测试方法。结合随机振动理论, 获取随机振动下建筑工程功率谱密度函数, 分析建筑随机振动下响应功率; 依照响应功率谱密度, 分析随机振动下建筑工程各阶谱矩、均方差值等抗震性能概率特征, 检测建筑工程在随机地震振动下的抗震性。以我国某省建筑工程为实验对象, 验证测试方法的抗震参数检测性能, 结果表明: 提出的方法在随机振动作用下, 能有效获取建筑工程的功率谱密度, 和振动波动情况, 且检测失效概率与可靠度与实际情况更为相近。

**关键词:** 随机振动; 建筑工程; 抗震性; 检测; 功率谱; 激励

中图分类号: TU442.5      文献标志码: A      文章编号: 1001-8662(2019)01-0086-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.01.014

## Testing and Experimental Analysis of Seismic Parameters of Building Engineering under Random Vibration

CHEN Xianming

(Qinghai Nationalities University, Xining 810005, China)

**Abstract:** Random vibration causes serious damage to building engineering, and the damage degree of random vibration is difficult to quantify. It is difficult to test seismic parameters, which poses a great threat to the stability of related building engineering. The seismic test method of building engineering under random vibration is studied. Based on the theory of random vibration, the power spectral density function of building engineering under random vibration is obtained, and the response power under random vibration is analyzed. According to the response power spectral density, the probability characteristics of seismic performance such as spectral moments and mean square deviation of building engineering under random vibration are analyzed, and the seismic performance of building engineering under random seismic vibration is tested. The test results show that the proposed method can effectively obtain the power spectral density and vibration fluctuation of a building project under random vibration, and the detection failure probability and reliability are more similar to the actual

收稿日期: 2018-01-15

作者简介: 陈先明(1977-), 男, 本科, 工程师, 主要从事建筑工程研究。

E-mail: chen102829@163.com.

situation..

**Keywords:** Random vibration; Building engineering; Seismic performance; Detection; Power spectrum; Excitation

## 0 引言

地震灾害频繁,会对一些大型建筑工程结构造成破坏,给建筑工程的稳定性带来极大威胁<sup>[1]</sup>。地震作用多被认为是等效静荷载或确定性动荷载,由于地震发生地点、时间与过程均存在显著随机性,应以随机过程描述地震作用更加准确<sup>[2]</sup>。因此,研究相关建筑随机振动下,抗震参数检测方法具有较为重要的意义。我国很多地区处于地震多发地带,对相关建筑的抗震性能参数检测方法的研究成果较多,例如文献[3]利用概率密度演化理论,分析我国某市建筑的抗震性,文献[4]分析了钢框架晃动情况下的建筑结构抗震性数学模型,这两种方法取得了较好的成功,但是,忽略了振动的随机性,分析结果不全面,误差较高;文献[5]提出随机结构复合随机振动分析的概率密度演化方法,利用扩展状态变量,构建涵盖随机初始条件的状态方程,推导建筑结构的概率密度演化方程,该方法虽然考虑了地震振动的随机性,但计算过程过于复杂。本文提出随机振动下建筑工程抗震性检测方法,在随机振动理论的基础上,采用随机振动虚拟激励法测试建筑工程抗震性能参数。

## 1 随机振动下建筑工程抗震性能参数测试

### 1.1 随机振动的相关参数计算

假设  $\ddot{u}_g(t)$  为地面加速度,则  $\ddot{u}_g(t)$  作用下多自由度体系(建筑工程)的运动方程可通过式(1)描述:

$$I\ddot{Y}(t) + N\dot{Y}(t) + LY(t) = -I\{E\}\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式内,  $I$ 、 $N$  和  $L$  分别表示建筑工程的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,  $Y(t)$  和  $\{E\}$  分别表示建筑工程位移和能耗。

在求解随机振动前  $f$  阶( $f < n$ )特征频率与相应振型过程中,引用振型叠加方法<sup>[6]</sup>,使建筑工程位移表达式为:

$$Y = [\alpha] \{x\} = \sum_{j=1}^f \{\alpha\}_j \{x\}_j \quad (2)$$

其中,  $[\alpha]$  和  $\{x\}$  分别表示前  $q$  阶振型矩阵和广义坐标向量<sup>[7]</sup>;  $\{\alpha\}_j$  和  $\{x\}_j$  表示第  $j$  阶振型向量和第  $j$  个广义坐标。

可将式(1)解耦,获取:

$$\ddot{x}_j + 2k_j w_j \dot{x}_j + w_j^2 x_j = \beta_j \ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

其中,  $k_j$  和  $w_j$  分别表示第  $j$  阶振型的阻尼比和特征频率;  $\beta_j$  表示第  $j$  阶振型的参与系数,  $\beta_j = \frac{\alpha_j^T I E}{(\alpha_j^T I \alpha_j)}$ 。

通过式(4)描述式(1)解向量的随机振动功率谱矩阵,表示为:

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^f \sum_{j=1}^f \beta_i \beta_j A_i^* A_j \varphi_i \varphi_j^T S_{\ddot{u}_g} \quad (4)$$

式(4)内,  $\beta_i$ 、 $\varphi_i$  和  $S_{\ddot{u}_g}$  分别表示第  $i$  阶振型的参与系数、第  $i$  阶振型向量和  $\ddot{u}_g(t)$  的自功率谱密度函数;  $A_j$  表示激励功率谱密度,计算公式如下:

$$A_j = \frac{1}{\omega_j^2 - \omega^2 + 2ik_j \omega \omega} \quad (5)$$

式(5)内的解向量功率谱矩阵的对角线可解释为解向量  $Y$  中不同元素的自功率谱密度函数值<sup>[8]</sup>。

上文根据给定的激励功率谱密度函数,通过功率谱密度分析,可获取建筑工程的随机振动功率谱密度函数,分析随机振动激励下建筑工程响应功率情况。

### 1.2 随机振动下建筑工程响应参数计算

通常情况下,受随机振动激励作用,建筑工程的动力方程还可通过式(6)表示:

$$\begin{bmatrix} I_{ss} & I_{sb} \\ I_{sb}^T & I_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{ss} & N_{sb} \\ N_{sb}^T & N_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sb} \\ L_{sb}^T & L_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ X_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ p_b \end{bmatrix} \quad (6)$$

式内,  $I_{ss}$ 、 $I_{sb}$ 、 $I_{bb}$  分别表示建筑工程的质量矩阵、支点和建筑工程耦联的质量矩阵和支点处的质量矩阵;  $N_{ss}$ 、 $N_{sb}$ 、 $N_{bb}$  分别表示建筑工程的刚度矩阵、支点和建筑工程耦联的阻尼矩阵和支点处

的阻尼矩阵;  $L_{ss}$ 、 $L_{sb}$ 、 $L_{bb}$  分别表示建筑工程的阻尼矩阵、支点和建筑工程耦合的刚度矩阵和支点处的刚度矩阵;  $\{X_b\}_{3m}$ 、 $\{X_s\}_{3m}$ 、 $\{P_b\}_{3m}$  和上标  $T$  分别表示释放  $n$  在各支点上的强迫位移<sup>[10]</sup>、建筑工程的绝对位移、支点处的支撑力和转置。

展开式 (6) 内的第二行能够得到:

$$I_{sb}^T \ddot{X}_s + I_{bb} \ddot{X}_b + N_{sb}^T \dot{X}_b + L_{sb}^T X_s + L_{bb} X_b = P_b \quad (7)$$

式内,  $I_{bb}$  同  $\ddot{u}_g(t)$  相乘能够得到支撑力, 也就是  $P_b = I_{bb} \ddot{u}_g(t)$ , 那么式(6)能够转换为:

$$I_{sb}^T (I_{ss}^T \ddot{X}_s + I_{bb} \ddot{X}_b + N_{sb}^T \dot{X}_s + N_{bb} \dot{X}_b + L_{sb}^T X_s + L_{bb} X_b) = \ddot{u}_g(t) \quad (8)$$

若支点处质量矩阵为无穷大<sup>[11]</sup>, 也就是  $M_{bb}^{-1} \rightarrow 0$ , 那么:

$$\ddot{X}_b = \ddot{u}_g \quad (9)$$

通过式(8)、(9)能够得到, 在  $L_{bb}$  足够大的条件下, 支点处地震响应加速度与地面加速度雷同, 也就是随机振动下建筑工程抗震性能检测中通常采用的大质量法<sup>[12]</sup>, 通常情况下  $L_{bb}$  值为建筑工程总重量的 106 倍左右。

在式(6)的第一行内引入式(9)能够得到:

$$I_{ss} \ddot{X}_s + N_{ss} \dot{X}_s + L_{ss} X_s = -(I_{sb} \ddot{u}_g + N_{sb} \dot{u}_g + L_{sb} u_g) \quad (10)$$

随机振动虚拟激励法中<sup>[13]</sup>, 建筑工程支点处的虚拟激励如下:

$$\ddot{u}_g = P e^{i\omega t}, \dot{u}_g = \frac{P e^{i\omega t}}{i\omega}, u_g = \frac{P e^{i\omega t}}{\omega^2} \quad (11)$$

分解输入地面运动的功率谱密度矩阵可获取式(11)内的, 过程如下:

$$[S_0(\omega)]_{3m \times 3n} = P^* P^T = [e^{-i\omega T_r}]^* [S_{\tilde{X}}][M][S_{\tilde{X}}][e^{-i\omega T_r}] \quad (12)$$

式(12)内,  $[S_0(\omega)]_{3n \times 3n}$  表示输入地面运动的功率谱密度矩阵,  $\omega$  为随机振动频率点,  $S_{\tilde{X}}$  表示谱强度因子,  $M$  表示正定或半正定时对称矩阵, 可用  $[M] = [Q][Q]^T$  表示。  $e^{-i\omega T_r}$  表示最能耗均值。其中,

$$[e^{-i\omega T_r}] = \text{diag} [e^{-i\omega T_{1x}}, e^{-i\omega T_{1y}}, e^{-i\omega T_{1z}}, e^{-i\omega T_{2x}}, e^{-i\omega T_{2y}}, e^{-i\omega T_{2z}}, \dots, e^{-i\omega T_{mx}}, e^{-i\omega T_{my}}, e^{-i\omega T_{mz}}] \quad (13)$$

$$[S_{\tilde{X}}] = \text{diag} [\sqrt{S_{\tilde{X}1x}}, \sqrt{S_{\tilde{X}1y}}, \sqrt{S_{\tilde{X}1z}}, \sqrt{S_{\tilde{X}2x}}, \sqrt{S_{\tilde{X}2y}}, \sqrt{S_{\tilde{X}2z}}, \dots, \sqrt{S_{\tilde{X}mx}}, \sqrt{S_{\tilde{X}my}}, \sqrt{S_{\tilde{X}mz}}] \quad (14)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & |p_{12}| & \cdots & |p_{1n}| \\ |p_{21}| & 1 & \cdots & |p_{2n}| \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ |p_{n1}| & |p_{n2}| & \cdots & |p_{nn}| \end{bmatrix} \quad (15)$$

通过上述公式可将式 (12) 表示为:

$$[S_0(\omega)]_{3m \times 3n} = P^* P^T = [e^{-i\omega T_r}]^* [S_{\tilde{X}}][Q][Q]^T [S_{\tilde{X}}][e^{-i\omega T_r}] \quad (16)$$

式(16)内,  $P = [e^{-i\omega T_r}][S_{\tilde{X}}][Q]$ 。

分析式(16)得到, 在随机振动虚拟激励法中, 通过矩阵可分别反映出不相干效应、行波效应以及局部场地效应<sup>[14]</sup>。

在式(10)中引入式(16)得到:

$$I_{ss} \ddot{X}_s + N_{ss} \dot{X}_s + L_{ss} X_s = - \left( I_{sb} + \frac{N_{sb}}{i\omega} + \frac{L_{sb}}{\omega^2} \right) P e^{i\omega t} \quad (17)$$

可将式(17)理解为各  $\omega$  处的简谐运动方程。在 ANSYS 软件内采用大质量法运算式(17)能够得到虚拟绝对位移<sup>[15]</sup>。根据随机振动虚拟激励法, 建筑工程绝对位移相应的响应功率谱密度如下所示:

$$S_{X_s X_s}(\omega) = \tilde{X}_s^* \tilde{X}_s^T \quad (18)$$

依照响应功率谱密度可分析得到响应的随机振动下各阶谱矩、均方差值等抗震性能概率特征。

基于随机振动理论分析真实建筑工程有限元模型的功率谱密度, 获取随机振动下建筑工程响应的功率谱密度曲线, 那么建筑工程响应的均方差为:

$$\sigma_{xi} = \sqrt{E[Y_{xi}(t)^2]} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} S_{xi}(\omega) d\omega} \quad (19)$$

其导数均方差公式如下:

$$\sigma_{\dot{x}i} = \sqrt{E[\dot{Y}_{xi}(t)^2]} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \omega^2 S_{xi}(\omega) d\omega} \quad (20)$$

基于式(19)、式(20)的计算结果获取随机振动激励下建筑工程失效概率及可靠性指标。

## 2 实验分析

为验证本文提出的随机振动下建筑工程抗震性能检测方法的检测性能, 以我国某省的大跨度预应力建筑工程为实验对象, 采用本文方法检测其抗震性能。实验对象背景如表 1 所示。模拟实验对象主梁与主墩构建有限元模型时, 利用 ANSYS 有限元分析软件中的 Beam188 单元。

表 1 实验对象背景

Table 1 Experimental object background

项目	具体情况
场地类型	II 类
抗震设防烈度	VIII 度
桥跨布置	90 m+175 m+90 m
墩高	100.45 m 和 111.68 m
主墩类型	C40 砼空心矩形截面墩
主梁类型	C60 砼箱梁

2.1 横向刚度分析

实验对象建筑较高，分析其自振特性得到，基频和基本周期分别为 0.177 1 Hz 和 5.2 s，由此得到实验对象为柔性结构。随机振动前 10 阶振型内，横弯高达 7 阶，其中第一阶于第二阶振型均为横弯，如图 1 所示。说明实验对象建筑横向刚度较小。



图 1 实验对象一阶正对称横弯振型  
Fig.1 First-order positive symmetry transverse bending mode

2.2 随机振动下建筑工程功率谱密度参数测试

随机振动下建筑工程抗震性能参数分析通常通过上一章节的功率谱密度反映地振动的特征。在地震过程中，振动频率不是平稳随机的，而是呈现出由弱至强，再由强至弱的过程。通常情况下，实验中，在描述非平稳地振动激励时，会选用平稳过程与确定性包络函数相乘的方式，即：

$$y(t)=\varphi(t)\cdot x(t)$$
(21)

其中， $\varphi(t)$ 与 $x(t)$ 分别表示确定性时间包络函数和随机振动过程。 $\varphi(t)$ 描述 $x(t)$ 的非平稳性，表达式如下：

$$y(t)=\varphi(t)\begin{cases} \left\{\frac{t}{t_1}\right\} & (t<t_1) \\ 1 & (t_1\leq t\leq t_2) \\ e^{-c(t-t_2)} & \end{cases}$$
(22)

其中， $t$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 和 $c$ 分别表示为随机振动持续总时间、由振动激励开始至地震振动激励平稳阶段的时间、振动激励平稳段结束的时间以及参数控制下降段的降低速度。为使非平稳随机振动过程与平稳随机振动过程的效果一致，可调节功率谱模型参数。

基于实验对象规划资料得到实验对象功率谱模型参数，详见表 2。依据表 2 中的数据采用本文检测方法得到水平双向地震作用下实验对象的功率谱密度曲线，如图 2 所示。

表 2 实验对象功率谱模型参数  
Table 2 Power spectrum model parameters of experimental objects

参数	具体情况
高频拐角周期	0.008 s
低频拐角频率	0.617 rad/s
场地卓越频率	13.41 rad/s
场地图阻尼比	0.715
强度因子	59.10 cm <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>
地震持续时间	12.55 s

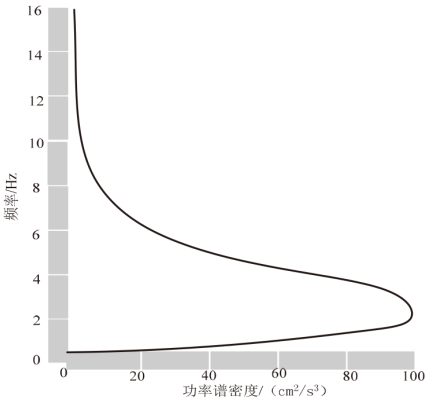


图 2 功率谱密度阵曲线  
Fig.2 Power spectral density curve

分析图 2 得到，随着振动频率的提升，功率谱密度呈现出先升后降的状态，当振动频率为 2Hz 左右时，功率谱密度达到最高。实验结果表明本文方法能够有效分析实验建筑工程在水平双向地震作用下的功率谱密度，获取建筑工程的振动波动情况。

2.3 失效模式与可靠性计算

采用本文提出的方法，分析实验对象随机振动响应，获取水平双向地震作用下实验对象的弯矩均方根，结果如图 3 所示。

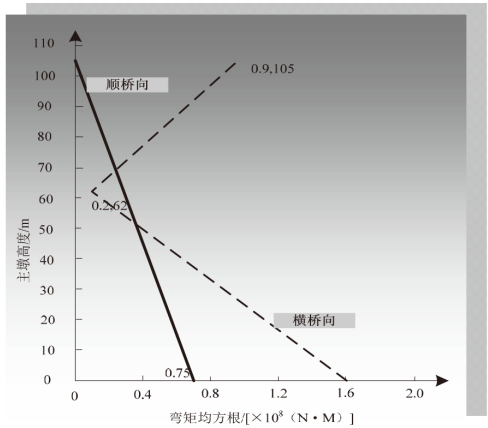


图 3 水平双向地震激励下实验对象底部弯矩均方根  
Fig.3 The root mean square of the bottom bending moment of the experimental object under horizontal two-way vibration excitation

分析图 3 可知,该方法能够有效分析水平双向地震振动激励下实验对象横桥向与顺桥向的弯矩均方根,说明本文方法的有效性。

失效概率与可靠度指标是随机振动下建筑工程抗震性检测的两个重要指标。相关研究人员在分析建筑工程增量动力时发现,通常情况下地震过程中建筑工程抗震性能最先失效的位置为建筑底部。在国家相关规定中也明确规定出:E2 地震作用下 A 类建筑会出现局部轻度受损现象,在无修复行为或简单修复后仍可使用。因此,在判断建筑工程失效模式时,以地震随机振动作用下建筑工程底部位置弯矩超出额定限额为建筑工程失效标志。

采用本文提出的方法,计算实验对象弯矩功率谱密度曲线,结果如图 4 所示。

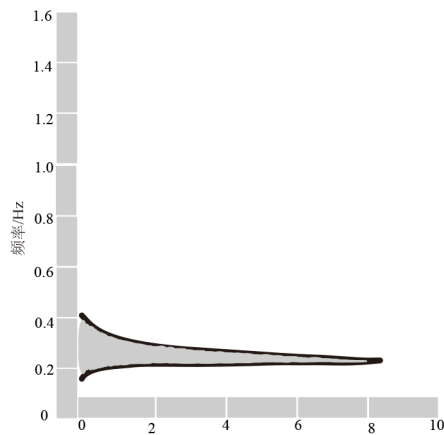


图 4 实验对象底部弯矩功率谱密度曲线

Fig.4 The bending moment power spectral density curve of the experimental object

表 3 不同方法失效概率及可靠度指标对比结果  
Table 3 Comparison of failure probability and reliability index of different methods

方法	墩底	失效概率	可靠度	计算时间/s
实际情况	3# 墩底	$1.143\times10^{-6}$	4.61	
	4# 墩底	$7.765\times10^{-7}$	4.68	
本文方法	3# 墩底	$1.146\times10^{-6}$	4.6	0.86
	4# 墩底	$7.766\times10^{-7}$	4.69	0.93
基于概率密度演化理论的检测方法	3# 墩底	$1.189\times10^{-6}$	4.43	1.56
	4# 墩底	$7.722\times10^{-7}$	4.49	1.72
基于随机结构复合随机振动分析的检测方法	3# 墩底	$1.087\times10^{-6}$	4.38	1.68
	4# 墩底	$7.803\times10^{-7}$	4.91	1.77

根据图 4 获取实验对象弯矩均方差及其导数均方差,计算实验对象底部位置失效概率及可靠度指标。将本文方法获取的计算结果与基于概率密度演化理论的建筑工程抗震性能检测方法和基于随机结构复合随机振动分析的建筑工程抗震性能检测方法的计算结果相比较,结果如表 3 所示。

分析表 3 可知,与其他两种方法相比较,提出的方法得到的失效概率与可靠度指标与实际情况更为相近,且计算时间也低于对于方法。实验结果表明提出的方法能够准确检测随机振动下建筑工程抗震性,且具有较高的检测效率。

3 结语

本文基于随机振动理论,提出随机振动下建筑工程抗震性检测方法,采用随机振动虚拟激励法,依照响应功率谱密度分析获得响应的随机振动下各阶谱矩、均方差值等抗震性能概率特征,并基于随机振动下建筑工程响应的功率谱密度曲线,运算得到建筑工程响应的均方差,获取随机振动激励下建筑工程失效概率及可靠性指标,有效检测建筑工程在随机地震振动下的抗震性。利用软件仿真我国某省的大跨度预应力连续建筑工程,分析该建筑工程在水平双向地震作用下的横向刚度、功率谱密度矩阵曲线及失效概率与可靠度指标情况,得到本文方法可全面、准确检测随机振动下建筑工程抗震性,且检测效率高。

参考文献:

[1] 付建. 随机振动下大跨度钢管混凝土柱结构抗震性能测试方法[J]. 地震工程学报,2018,40(2):241-245.

[2] López - Almansa F,Segués E,Cantalapiedra I R. A new steel framing system for seismic protection of timber platform frame buildings. Implementation with hysteretic energy dissipators[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2015,44(8):1181-1202.

[3] 陈卫忠,宋万鹏,赵武胜,等. 地下工程抗震分析方法及性能评价研究进展[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(02):54-69.

[4] 郭汉东. 建筑施工中钢框架晃动下抗震性数学建模分析[J]. 计算机仿真,2015,32(12):202-205.

[5] Bretas E M,Jos V. Lemos,Paulo B. Lourenço. Seismic Analysis of Masonry Gravity Dams Using the Discrete Element Method: Implementation and Application [J]. Journal of Earthquake Engineering,2016,20 (2):157 - 184.

- [6] 杜骞,夏修身,孙学先. 大跨度钢管混凝土拱桥非线性抗震性能研究[J]. 地震工程学报,2018,40(2):206-212.
- [7] 陈华霆,谭平,彭凌云,等. 基于隔震结构 Benchmark 模型的复振型叠加反应谱方法[J]. 振动与冲击,2017,36(23):157-163.
- [8] 任文杰,王利强,穆蒙蒙. SMA 阻尼器控制单自由度结构在地震激励下的平稳随机振动研究[J]. 工程力学,2016,33(4):98-103.
- [9] El-Aal E A K A,Yagi Y,Kamal H,et al. Implementation of integrated multi-channel analysis of surface waves and waveform inversion techniques for seismic hazard estimation [J]. Arabian Journal of Geosciences,2016,9(4):1-16.
- [10] 常亚峰,梁兴文,汪平,等. 隔震防倒塌支座及楼梯间位置对框架结构抗震性能的影响研究[J]. 地震工程学报,2017,39(6):996-1004.
- [11] 马长飞,王波,汪正兴,等. 完全非平稳地震作用下斜拉桥随机响应分析[J]. 桥梁建设,2016,46(1):30-34.
- [12] 苏成,黄志坚,刘小璐. 高层建筑地震作用计算的时域显式随机模拟法[J]. 建筑结构学报,2015,36(1):13-22.
- [13] 侯文萃,陈能远,高洁. 基坑排桩对建筑抗震性的影响分析[J]. 地震工程学报,2018,v.40(2):65-70.
- [14] 张敏,占科彪. 底部框架双功能减震结构减震参数的取值分析[J]. 工程抗震与加固改造,2017,39(5):62-69.
- [15] 鲁江,秦健,潘磊,等. 南京 UPFC 工程控制保护系统架构与配置研究[J]. 电力工程技术,2015,34(6):1-5.