

周磊. 岩溶区砌体建筑环境振动特性分析[J]. 华南地震, 2019, 39 (1): 97-103. [ZHOU Lei. Analysis of Environmental Vibration Characteristics of Masonry Buildings in Karst Areas[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(1): 97-103]

## 岩溶区砌体建筑环境振动特性分析

周 磊

(杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 当前地震动速度时程时域特性分析方法, 仅能分析岩溶区地震动速度时程的振动周期、强弱程度与时间变动的问题, 但未能准确计算岩溶区砌体建筑物自振频率, 导致砌体建筑环境振动特性分析结果存在误差。深入研究岩溶区砌体建筑环境振动特性分析方法, 构建混凝土损伤塑性模型, 分析岩溶区砌体建筑材料的屈服(受压)应力-非弹性应变关系、开裂(受拉)应力-非弹性应变关系和损伤因子; 采用贝叶斯方法检测岩溶区砌体建筑受压受拉时的自振频率, 通过 L-M 神经网络法消除自振频率后, 使用振动特性分析方法准确分析岩溶区砌体建筑环境振动特性。实验结果表明, 所提方法分析准确率高达 0.99, 分析 16 栋岩溶区砌体建筑环境振动特性耗时仅有 5 ms, 具有较高的分析精度和效率。

**关键词:** 岩溶区; 砌体建筑; 环境振动特性; 贝叶斯; L-M 神经网络; 振型

**中图分类号:** TU365 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2019)01-0097-07

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2019.01.016

## Analysis of Environmental Vibration Characteristics of Masonry Buildings in Karst Areas

ZHOU Lei

(Yangling Vocational and Technical College, yangling 712100, China)

**Abstract:** In the past, using the method of analyzing the time-domain characteristics of ground vibration speed, only the problem of the vibration period, the degree of strength, and the time change of ground vibration speed time in the Karst area can be analyzed, but the self-vibration frequency of masonry buildings in the Karst area can not be accurately calculated. The results of analysis on the vibration characteristics of masonry building environment have some errors. To study the new analysis method of vibration characteristics of masonry environment in Karst area, the paper builds concrete damage plastic model, analyzes the yield (compression) stress-inelastic strain relation, crack (tensile) stress-inelastic strain relation and damage factor of masonry building materials in Karst area; Bayesian method was used to detect the vibration frequency of masonry buildings under pressure and pull in the Karst area. After eliminating the vibration frequency by the L-M neural

**收稿日期:** 2018-01-15

**作者简介:** 周磊 (1983-), 男, 讲师, 硕士研究生, 主要从事建筑与土木工程研究。

**E-mail:** zhoulei7497@163.com.

network method, the vibration characteristics analysis method was used to accurately analyze the vibration characteristics of masonry buildings in the Karst area. The experimental results show that the analysis accuracy of the proposed method is as high as 0.99, and the analysis of the vibration characteristics of 16 masonry buildings in Karst areas takes only 5 ms, which has high analysis accuracy and efficiency.

**Keywords:** Karst area; Masonry building; Environmental vibration characteristics; Bayesian; L-M neural network; Vibration mode

## 0 引言

在岩溶地质上进行建筑施工时, 岩溶发育会导致地面上出现大面积的石芽、岩溶, 导致地面出现坑洼状态; 地下溶洞会导致岩体出现缺失, 岩溶水动力条件的变动导致上部掩盖土层出现沉降, 建筑结构的抗震性能令人堪忧, 隐患较为严重。随着人们对自然资源逐渐开发和使用, 岩溶区的地质、环境问题发生地震的概率较高。因此, 对岩溶区砌体建筑环境振动特性分析极其重要。也有相关学者提出了一些方法, 文献[1]提出的地震动速度时程时域特性分析方法, 主要采用速度零点法分析地震动速度时程的振动周期、强弱程度与时间变动的问题, 但未能准确计算建筑物自振频率, 导致分析结果存在误差; 文献[2]分析了动态时间归整距震动特性分析方法, 由于该方法分析过程较为复杂, 在建筑环境振动特性分析时工作耗时过多, 效率低下; 文献[3]中研究的建筑砌体结构的动力特性分析方法, 仅能分析村镇建筑, 未能评估城市高层建筑, 存在一定使用局限。

## 1 岩溶区砌体建筑环境振动特性分析

### 1.1 材料本构关系的选取

针对岩溶区砌体建筑使用整体式建模方式, 使用混凝土损伤塑性模型描述建筑材料。混凝土塑性模型由塑性、损伤、损伤和塑性耦合因子构成。塑性部分的本构联系根据屈服应力—非弹性应变关系、开裂应力—非弹性应变曲线构建<sup>[4-6]</sup>。

#### 1.1.1 屈服(受压)应力—非弹性应变关系的判定

岩溶区砌体建筑屈服(受压)应力—非弹性应变曲线为:

$$\alpha \leq \alpha_0: \quad \sigma/g_m = 1.15(\alpha/\alpha_0) - 0.15(\alpha/\alpha_0)^2 \quad (1)$$

$$\alpha_0 \leq \alpha \leq 6\alpha_0: \quad \sigma/g_m = 1.3 - 0.2(\alpha/\alpha_0) \quad (2)$$

其中, 峰值应变设成  $\alpha$ , 岩溶区砌体建筑抗压强度均值设成  $g_m$ , 应力—应变曲线里的点应力设成  $\sigma$ ,  $\sigma$  的应变为  $\alpha$ 。根据公式(1)和公式(2)获取岩溶区砌体建筑名义应力—应变曲线变换成真实应力—应变曲线。使用公式(3)变换成屈服应力—非弹性应变曲线:

$$\alpha^{in} = \alpha^{true} - \sigma/C_0 \quad (3)$$

其中, 岩溶区砌体建筑非弹性应变与真实应变分别设成  $\alpha^{in}$ 、 $\alpha^{true}$ ; 砌体峰值应变设成  $C$ 。

#### 1.1.2 开裂(受拉)应力—非弹性应变关系的判定

将砌体建筑的屈服、开裂弹性模量设成等值, 砌体建筑一旦出现开裂便变成塑性极端<sup>[7-9]</sup>。 $\tau$  表示塑性因子。则应力—应变曲线为:

$$\alpha \leq \alpha_0: \quad \alpha = \tau/C \quad (4)$$

$$\alpha \geq \alpha_0: \quad \sigma/g_m = \alpha/\alpha_0 / 2(\alpha/\alpha_0 - 1)^{1.7} + \alpha/\alpha_0 \quad (5)$$

其中, 砌体建筑抗拉强度均值设成  $g_m$ 。

#### 1.1.3 损伤因子的判定

混凝土损伤塑性模型里损伤部位必须设定受压损伤因子  $o_c$ 、受拉损伤因子  $o_t$ , 以此描述砌体建筑材料在荷载影响下的刚度减少情况<sup>[10]</sup>。采用等效能量法运算岩溶区砌体建筑的损伤因子  $o_c$ 、 $o_t$  为:

$$\sigma = C_0(1 - o_{t,c})^2 \alpha \quad (6)$$

## 2.2 基于贝叶斯方法的岩溶区砌体建筑自振频率检测

基于上小节分析的建筑材料自身信息, 采用贝叶斯方法检测建筑受压受损时的自振频率, 用于检测岩溶区砌体建筑自振频率的贝叶斯方法原理是:

$$q(\varphi/E) = \frac{q(E/q(\varphi))}{q(E)} hK(\varphi) q(\varphi) = hM(\varphi) \quad (7)$$

其中, 获取的岩溶区砌体建筑新实测信息设成  $E$ ; 岩溶区砌体建筑待定参数设成  $\varphi$ ;  $q(\varphi)$  表示参数的先验概率密度函数, 其通过已获取的实测数据和剩余先验数据决定<sup>[11]</sup>, 剩余先验数据包含已

有规律、岩溶区砌体建筑工程经验与主观判定等因素。若设  $q(\varphi)/q(E)$  是常数, 那么贝叶斯方法能够转换成极大似然估计方法; 似然函数设成  $K$ ,  $K(\varphi)=q(E/\varphi)$ , 描述在已获取参数  $\varphi$  的前提下获取的实际信息  $E$  的概率;  $h$  表示正则化因子,  $h=1/q(E)$ , 设定等式的积分是 1;  $q(\varphi|E)$  表示岩溶区砌体建筑参数  $\varphi$  的后验概率密度函数。

因为正则化因子  $h$  的判定存在一定难度,  $q(\varphi|E)$  未能轻易通过公式(1)计算获取。所以, 使用马尔科夫蒙卡洛(MCMC)抽样方法, 在  $q(\varphi|E)$  里进行岩溶区砌体建筑样本抽样<sup>[12]</sup>。若抽取的数目达到一定数量时, 样本间的相关性降低到较小的程度, 该类样本可以供给充分的岩溶区砌体建筑信息, 最终完成  $q(\varphi|E)$  重构<sup>[13-15]</sup>。具体流程是:

- (1) 随机抽取参数样本值  $\beta$ 。
- (2) 根据公式(2)获取比值  $c_i$ 。

$$c_i = \frac{M(\beta)q^*(\varphi_i|\beta)}{M(\varphi_i)q^*(\beta|\varphi_i)} \quad (8)$$

其中, 似然函数和先验概率密度函数相乘后的值设成  $M(\cdot)$ ;  $q^*(\cdot|\cdot)$  表示建议概率密度函数。

(3) 在均匀分布(0, 1)里随机抽取值  $b_i$ , 若  $C_i > b_i$ , 则  $\beta$  属于  $q(\varphi|E)$  的样本, 假设  $\varphi_{i+1} = \beta$ , 跳回第(1)步抽样, 反之拒绝  $\beta$ , 跳转回第(1)步循环抽样<sup>[14-16]</sup>。

检测过程中, 通过中心极限定理可知检测误差均值是 0 的正态分布前提下, 则有:

$$e = \tilde{s} - s \sim \frac{1}{\sqrt{2\pi\varepsilon}} \exp\left[-\frac{e^2}{2\varepsilon^2}\right] \quad (9)$$

其中, 岩溶区砌体建筑环境自振频率检测误差设成  $e$ , 自振频率实测值和实际值分别设成  $\tilde{s}$ 、 $s$ , 误差分布的方差用  $\varepsilon^2$  描述。

若获取的是自振频率的  $i$  个实测值, 则自振频率的似然函数是:

$$K(\tilde{s}_1, \tilde{s}_2, \dots, \tilde{s}_i, A|s) = (2\pi\varepsilon^2)^{-i/2} \exp\left[-\sum_{i=1}^i \frac{(\tilde{s}_i - s)^2}{2\varepsilon^2}\right] \quad (10)$$

其中, 岩溶区砌体建筑自振频率的第  $i$  实测值设成  $\tilde{s}_i$ ,  $A$  表示似然函数里对检测误差的全部假设。

当实测数据和均值近似判定为方差  $\varepsilon^2$  后, 再导入公式(7), 便可使用马尔科夫蒙卡洛(MCMC)抽样方法获取岩溶区砌体建筑自振频率的样本后验分布<sup>[16]</sup>。

### 1.3 基于 L-M 神经网络法自振频率消除

自振频率是岩溶区砌体结构环境振动特性的

核心指标, 由于现场实际测量的信息有限, 且又具有分散性, 对其振动特征分析存在一定的误差, 因此上小节检测到建筑自振频率后, 使用 L-M 神经网络法消除自振频率, 提升分析岩溶区砌体建筑环境振动特性精度<sup>[17]</sup>。

使用 L-M 神经网络法去除建筑环境自振的原理用图 1 描述:

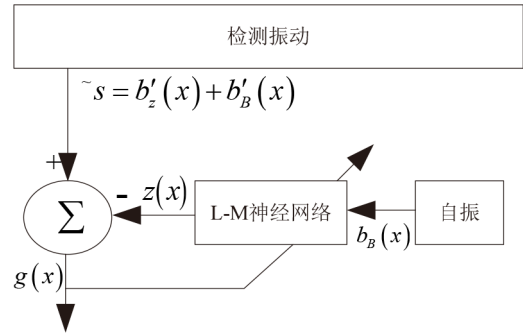


图 1 L-M 神经网络法原理图

Fig. 1 The schematic diagram of L-M neural network method

岩溶区砌体建筑自振因子设成  $b'_z(x)$ 、 $b'_B(x)$  无环境振动设成  $b_B(x)$ , L-M 神经网络对应  $b'_B(x)$  的输出设成  $z(x)$ , 输出的误差信号为  $g(x)$ , 那么:

$$g(x) = b'_z(x) + b'_B(x) - z(x) \quad (11)$$

两边相乘可获取:

$$g(x)^2 = b'_z(x)^2 + [b'_B(x) - z(x)]^2 + 2b'_z(x)[b'_B(x) - z(x)] \quad (12)$$

两边数学期望值为  $F[g^2(x)]$ :

$$F[g^2(x)] = F[(b'_z(x))^2] + F[(b'_B(x) - z(x))^2] + 2F[b'_z(x)b'_B(x) - z(x)] \quad (13)$$

因为  $b'_z(x)$  与  $b_B(x)$ 、 $b'_B(x)$  的激励形式具有差异性, 假定  $b'_z(x)$  和  $b'_B(x)$  不具备相关性, 则  $b'_z(x)$  和  $z(x)$  也不具备相关性, 则有:

$$F[g^2(x)] = F[(b'_z(x))^2] + F[(b'_B(x) - z(x))^2] \quad (14)$$

调整 L-M 神经网络的权值与阈值, 将输出误差变成最小值, 在  $F[g^2(x)]$  存在最小值时,  $F[(b'_z(x))^2]$  是干扰力, 则  $F[g^2(x)]$  最小化演变成:

$$\min F[g^2(x)] = F[(b'_z(x))^2] + \min F[(b'_B(x) - z(x))^2] \quad (15)$$

公式(15)表明当输出误差为最小值时, 与  $\min F[(b'_B(x) - z(x))^2]$  相等, 以此便可消除岩溶区砌体建筑自振<sup>[18]</sup>。

### 1.4 砌体建筑环境振动特性分析方法

#### (1) 振型识别

针对每个振动频率具有分散性, 且阻尼较小

的砌体建筑结构，在不特定激励背景中，振型比为：

$$\frac{\theta_{ai}}{\theta_{bi}} = \frac{N_{ba}(\varpi_i)}{N_{bb}(\varpi_i)}$$

(16)

其中， $a_i$ 测点与  $b$  测点的  $i$  阶振型坐标分别为  $\theta_{ai}$ 、 $\theta_{bi}$ 。 $a$  测点与  $b$  测点的互功率谱和  $b$  测点的自功率谱分别设成  $N_{ba}(\varpi_i)$ 、 $N_{bb}(\varpi_i)$ 。

振型坐标的正负值能够依据互谱位置判定<sup>[19]</sup>。不同振型需要选取不同测点进行对比。振型的动态展示是模态分析技术里较为常见的使用，根据计算机屏幕动态呈现振型，确保分析人员能够直接获取结构在每阶模态里的振动形式<sup>[20]</sup>。

(2)阻尼比计算

阻尼比可通过半功率方法计算，通过半功率

点幅值  $l(w_k)/\sqrt{2}$  判定半功率带宽  $\Delta\varpi = \varpi_2 - \varpi_1$ ，因此第  $j$  阶阻尼比是：

$$\gamma_j = \frac{\Delta\varpi}{2\varpi_k}$$

(17)

其中， $j$  阶共振峰的幅值设成  $l(w_k)$ ，频率为  $\varpi$ 。

2 实验分析

在我国岩溶区选取 16 栋砌体高层建筑采用本文方法、地震动速度时程时域特性分析方法和动态时间归整距震动特性分析方法进行建筑环境振动特性分析，三种方法对 16 栋高层建筑实际和分析结果的数据对比见表 1、表 2 和表 3：

表 1 本文方法分析精度测试结果

Table 1 Analysis of accuracy test results by the method presented in this paper

建筑编码	一阶振型		二阶振型		一阶振型分析准	二阶振型分析准
	实际	本文方法分析结果	实际	本文方法分析结果	确率	确率
1	1.54	1.53	0.65	0.64	0.99	0.99
2	1.32	1.31	0.66	0.65	0.99	0.99
3	1.45	1.44	0.45	0.44	0.99	0.99
4	1.55	1.54	0.56	0.55	0.99	0.99
5	1.34	1.34	0.34	0.33	0.99	0.99
6	1.45	1.44	0.67	0.66	0.99	0.99
7	1.46	1.45	0.45	0.44	0.99	0.99
8	1.55	1.45	0.76	0.75	0.99	0.99
9	1.34	1.33	0.65	0.64	0.99	0.99
10	1.54	1.53	0.34	0.33	0.99	0.99
11	1.52	1.51	0.54	0.53	0.99	0.99
12	1.54	1.53	0.57	0.56	0.99	0.99
13	1.66	1.65	0.34	0.33	0.99	0.99
14	1.45	1.44	0.65	0.64	0.99	0.99
15	1.45	1.64	0.55	0.54	0.99	0.99
16	1.44	1.43	0.34	0.33	0.99	0.99

表 2 地震动速度时程时域特性分析方法分析精度测试结果

Table 2 Accuracy test results of analysis method for time-history characteristics of ground motion

建筑编码	一阶振型		二阶振型		一阶振型分析准	二阶振型分析准
	实际	分析结果	实际	分析结果	确率	确率
1	1.54	1.12	0.65	0.22	0.73	0.34
2	1.32	1.12	0.66	0.23	0.85	0.35
3	1.45	1.23	0.45	0.21	0.85	0.47

(转下表)

(续表 2)

建筑编码	一阶振型		二阶振型		一阶振型分析准	二阶振型分析准
	实际	分析结果	实际	分析结果	确率	确率
4	1.55	1.23	0.56	0.23	0.79	0.41
5	1.34	1.22	0.34	0.21	0.91	0.62
6	1.45	1.21	0.67	0.43	0.83	0.64
7	1.46	1.01	0.45	0.11	0.69	0.24
8	1.55	1.11	0.76	0.11	0.72	0.14
9	1.34	1.09	0.65	0.11	0.81	0.17
10	1.54	1.01	0.34	0.13	0.66	0.38
11	1.52	1.21	0.54	0.09	0.80	0.17
12	1.54	1.21	0.57	0.12	0.79	0.21
13	1.66	1.42	0.34	0.11	0.86	0.32
14	1.45	1.21	0.65	0.12	0.83	0.18
15	1.45	1.11	0.55	0.13	0.77	0.24
16	1.44	1.10	0.34	0.14	0.76	0.41

表 3 动态时间归整距震动特性分析方法分析精度测试结果  
Table 3 Accuracy test results of dynamic time integration method for vibration characteristics analysis

建筑编码	一阶振型		二阶振型		一阶振型分析准	二阶振型分析准
	实际	分析结果	实际	分析结果	确率	确率
1	1.54	1.09	0.65	0.11	0.71	0.17
2	1.32	1.08	0.66	0.23	0.82	0.35
3	1.45	0.9	0.45	0.12	0.62	0.27
4	1.55	0.9	0.56	0.23	0.58	0.41
5	1.34	0.9	0.34	0.23	0.67	0.68
6	1.45	0.9	0.67	0.23	0.62	0.34
7	1.46	0.9	0.45	0.23	0.62	0.51
8	1.55	0.9	0.76	0.23	0.58	0.30
9	1.34	1.09	0.65	0.23	0.81	0.35
10	1.54	1.11	0.34	0.24	0.72	0.71
11	1.52	1.13	0.54	0.11	0.74	0.20
12	1.54	1.12	0.57	0.11	0.72	0.19
13	1.66	1.11	0.34	0.12	0.67	0.35
14	1.45	1.42	0.65	0.09	0.77	0.14
15	1.45	1.11	0.55	0.13	0.77	0.24
16	1.44	1.10	0.34	0.14	0.76	0.41

分析表 1、表 2 和表 3 数据可知, 本文方法对 16 栋砌体高层建筑环境振动特性分析精度较高, 一阶振型、二阶振型的分析准确率都为 0.99; 地震动速度时程时域特性分析方法对一阶振型分析准确率最大值为 0.91, 对二阶振型分析准确率最大值为 0.64; 动态时间归整距震动特性分析方法对一阶振型分析准确率最大值为 0.82, 对二阶振型分析准确率最大值为 0.71。该两种方法的分析

精度都未高于本文方法。本文方法具有较好的分析精度。

统计上述实验中三种方法的分析耗时, 对比结果用图 2 描述:

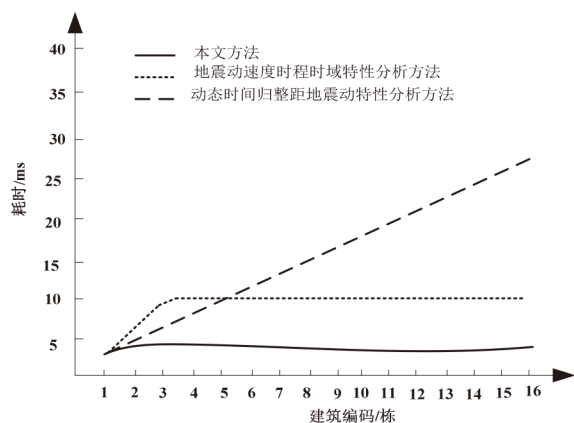


图 2 三种方法分析耗时对比

Fig. 2 Time-consuming comparison of the three methods

分析图 2 可知, 三种方法对 16 栋砌体建筑环境振动特性分析耗时差距较大, 本文方法最高耗时是 5 ms, 地震动速度时程时域特性分析方法最高耗时 11 ms, 动态时间归整距震动特性分析方法最高耗时 30 ms, 本文方法耗时最短, 分析效率较高。

在检测岩溶区砌体建筑环境振动特性时, 测试三种方法的鲁棒性, 测试结果见图 3:

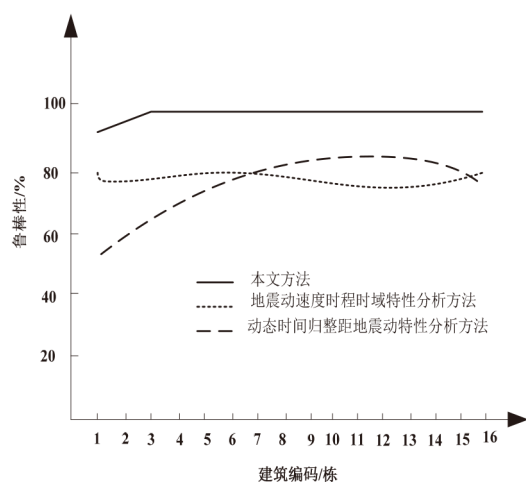


图 3 三种方法的鲁棒性测试结果

Fig. 3 Robustness test results of the three methods

由图 3 可知, 本文方法对 16 栋砌体建筑环境振动特性分析鲁棒性未低于 90%, 最高值 99%, 鲁棒性较高; 地震动速度时程时域特性分析方法和动态时间归整距震动特性分析方法的鲁棒性为未高于 80%, 本文方法鲁棒性最高, 性能较为稳定。

### 3 结语

文章提出一种新的岩溶区砌体建筑环境振动特性分析方法, 首先构建混凝土损伤塑性模型, 分析岩溶区砌体建筑材料的屈服(受压)应力—非弹性应变关系、开裂(受拉)应力—非弹性应变关系和损伤因子, 然后采用贝叶斯方法检测建筑受压受拉时的自振频率, 自振频率是砌体结构环境振动特性的核心指标, 由于现场实际测量的信息有限, 且又具有分散性, 对其振动特征分析存在一定的误差, 因此通过 L-M 神经网络法消除自振频率后, 使用振动特性分析方法分析砌体建筑环境振动振型与阻尼比。经验证, 本文方法的分析精度、分析效率和鲁棒性都高于地震动速度时程时域特性分析方法和动态时间归整距震动特性分析方法, 使用价值较高。

### 参考文献:

- [1] 赵国臣, 徐龙军, 谢礼立. 一种有效的地震动速度时程时域特性分析方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(6): 2138–2147.
- [2] 何浩祥, 解鑫, 王文涛. 基于动态时间归整距的地震动特性分析及合成精度评价[J]. 振动与冲击, 2018, 37(12): 207–215.
- [3] 吴韬, 王浩, 易苗苗, 等. 村镇建筑砌体结构的动力特性分析[J]. 地震工程学报, 2016, 38(6): 877–882.
- [4] 刘佩, 连鹏宇. 基于环境振动测试的框架结构主裙楼动力特性分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(10): 174–179.
- [5] 毕伟, 张楠, 庞翠平, 等. 地铁运行引起邻近建筑物振动的预测与分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(11): 29–33.
- [6] 潘磊, 李斌, 杨光, 等. 交流系统故障时统一潮流控制器处理策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(06): 138–143.
- [7] 陈洪运, 全德武. 高铁滨海北站路基段环境振动试验研究与数值分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(12): 135–140.
- [8] 毛顺茂, 熊超华, 雷晓燕. 地铁运营对古建筑物振动响应影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(10): 13–17.
- [9] 须磊. 强震动环境下网络通信信号优化提取仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(9): 195–198.
- [10] 耿传飞, 卢文良, 俞醒. 基于 L-M 算法的神经网络在环境振动分析中消除本底振动的应用 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 14–19.
- [11] Sun B, Zhang G. Study on vulnerability matrices of masonry buildings of mainland of China [J]. Earthquake Engineering & Engineering Vibration, 2018, 17(2): 251–259.
- [12] 张远, 吕淑然, 杨凯. 列车运行引起周边环境振动的监测与分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(3): 83–86.

- [13] Chaulagain H,Rodrigues H,Spacone E,et al. Seismic safety assessment of existing masonry infill structures in Nepal[J]. *Earthquake Engineering & Engineering Vibration*, 2016,15(2):251-268.
- [14] 解恒燕,张深远,郑鑫,等. 轨道交通引起季冻区饱和土场地环境振动衰减实测分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2017,01(02):173-180.
- [15] 王新,李晓慧,钱文勋. 高坝泄洪诱发场地振动特性原型观测分析[J]. *水力发电*,2017,43(3):115-119.
- [16] 张世海,梁伟,李录平,等. 国产 600MW 汽轮发电机组基础地震响应特性分析[J]. *工程抗震与加固改造*, 2017,39(3):67-72.
- [17] 张振斌,温瑞智,魏斌,等. 2013 年 8 月新疆乌鲁木齐市 5.1 级地震强震动记录及特征分析[J]. *地震工程学报*, 2016,38(1):144-149.
- [18] 吴祚菊,张建经,王志佳,等. 地震动场地放大效应的时频特性分析[J]. *岩土力学*,2017,38(3):685-695.
- [19] 郑智杰, 陈贻祥,甘伏平. 岩溶区岩土层地球物理性质浅析-以吉利岩溶塌陷区为例[J]. *地球物理学进展*, 2016,31(2):920-927.
- [20] 杨瑞召,金圣林,杨敏,等. 塔里木盆地塔河油田不同岩溶塌陷类型地震响应特征与识别[J]. *天然气地球科学*, 2017,28(3):391-396.