

柴瑞帅.地震波动强度变化的数学建模分析与仿真[J].地震工程学报,2018,40(3):549-554.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.549

CHAI Ruishuai.Mathematical Modeling Analysis and Simulation of Variations in Seismic Wave Intensity [J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(3):549-554.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.549

地震波动强度变化的数学建模分析与仿真

柴瑞帅

(河南经贸职业学院,河南 郑州 450046)

摘要:传统利用灰色关联分析方法对地震波动强度变化进行数学建模分析与仿真时,对地震波动强度变化的数列进行仿真分析时,忽略了地震波动强度的时间属性对结果的影响,导致分析结果准确性较低。本论述提出新的地震波动强度变化数学建模分析与仿真方法,通过地震波动强度序列的经验分布确定门限自回归模型的门限值,依据该门限值、AIC 最小准则以及最小残差平方等方法获取地震波动强度序列的门限自回归模型,分析自回归模型的极限环和振荡的属性特点,得到地震波动强度变化的初步数值模拟结果。本论述构建了基于均生函数的地震波动强度序列的数学模型,通过均生函数数学建模方法拟合地震波动强度时间序列,依据时间序列基于双评分准则选取拟合周期,实现地震波动强度的数值仿真。实验结果表明,所提方法对地震波动强度变化模型具有较高的准确性和稳定性。

关键词:地震波动强度;数学建模;地震波动强度序列;均生函数;双评分准则;门限自回归模型

中图分类号: P315.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)03-0549-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.549

Mathematical Modeling Analysis and Simulation of Variations in Seismic Wave Intensity

CHAI Ruishuai

(Henan Institute of Economics and Trade, Zhengzhou 450046, Henan, China)

Abstract: When the traditional grey prediction method is used to model and simulate variation in seismic wave intensity, the series of the variation is predicted without analyzing the time attribute of earthquake wave intensity. Hence, the accuracy of the analysis result is low. A new mathematical modeling analysis and simulation method for these variations is proposed in this paper. The threshold value of the threshold autoregressive model is determined by the empirical distribution of the seismic wave intensity series. The threshold autoregressive model of seismic wave intensity series is obtained by using the threshold value of the minimum criterion AIC and the least residual square method. The characteristics of limit cycles and oscillations of the auto-regressive model are analyzed, and the seismic wave intensity is obtained. The mathematical model of seismic wave intensity series is constructed based on the mean generating function. The time series of the earth-

收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 河南省软科学课题(172400410212); 河南省重大科技专项项目(162102310147)

作者简介: 柴瑞帅(1981—),男,河南新野人,硕士,讲师,研究方向为数学教育,仿真研究。E-mail:chairuishuai0206@163.com。

quake wave intensity is fitted by using the mean generation function. The fitting period is selected based on the double score criterion according to the time series. An accurate numerical simulation of seismic wave intensity is realized. The experimental results show that the proposed method is accurate and stable for the seismic wave intensity variation model.

Key words: seismic wave intensity; mathematical modeling; seismic wave intensity sequence; mean generating function; couple score criterion; threshold auto-regressive model

0 引言

地震的产生、爆发、震源等体系对地震变化有着显著影响^[1]。地震活动在不同内外因素彼此依附、协同的作用下,导致地震活动存在周期性、波动强度变化性以及爆发频度的时空性等特点^[2],基于全部作用与对作用产生影响的因素,建立波动强度序列数学模型^[3],能够对地震情况进行准确分析,确保群众生命和财产安全。

当前国内外相关人员针对地震波动强度变化研究的分析方法主要有以下几点:文献[4]仿真研究了不同声源深度产生海底地震波动情况,但是其仅适用于分析海底地震波动情况,并不适用于陆地地震波动强度的研究;文献[5]采用卡尔曼滤波的地震记录同相轴跟踪方法,分析地震波动强度变化,其要求地震波的相轴波动情况显著,抗干扰性能差;文献[6]设计了基于 EASY5 地震模拟振动台控制系统,其可对地震波动强度进行仿真分析,但是仅考虑了地震波的振动强度未考虑地震波的时间属性,分析结果具有一定的片面性。

以往通过灰色关联分析方法对地震波动强度变化进行数学建模分析与仿真时,对地震波动强度变化的数列实施仿真,未分析地震波动强度的时间属性,分析结果准确性较低^[7]。因此,本论述提出新的地震波动强度变化数学建模分析与仿真方法,实现地震波动强度变化的准确和稳定分析。

1 基于地震波动强度变化的数学建模

1.1 地震波动强度序列的经验分布

本论述在合理的时间段内选取最强地震作为 $M_s \geq 4.7$ 地震波动强度序列的采样标准,自然合理选取样本,采样的平均间隔、采样频率以及地震波动强度间的相关函数如图 1 所示,从图 1 可以看出,图上“正”“负”相间,震荡性以及短期相干性是该序列的特性^[8],体现出地震波动强度变化的特点。

$\{x_n\}$ 是由 n 个数据形成的序列,对其进行 $(x_{i1},$

$x_{i2}, \dots, x_{ik})$ 分割,该序列的经验分布可表示为:
$$x_j < x_{li} (i = 1, 2, \dots, k) (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

在可表达出数据序列的精度标准下,获得正确的分割数 k ,经验分布与归一化的地震波动强度频度分布,根据定义能够知道 1 是两者之和的值,归一化的地震波动强度与频度分布也在另一方面得到了体现。

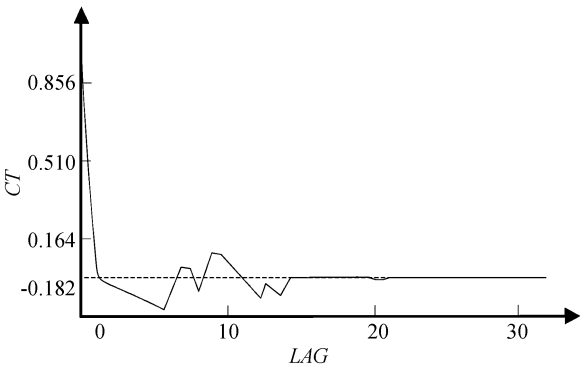


图 1 华北地震波动强度序列相关图

Fig.1 Correlogram of the sequence of seismic wave intensity in North China

数据序列的内部组成和分布情况可通过分析地震波动强度序列经验分布图获得,地震波动强度序列经验分布是数据序列自身的属性,更改序列对其无任何影响。序列的经验分布图如图 2 所示。

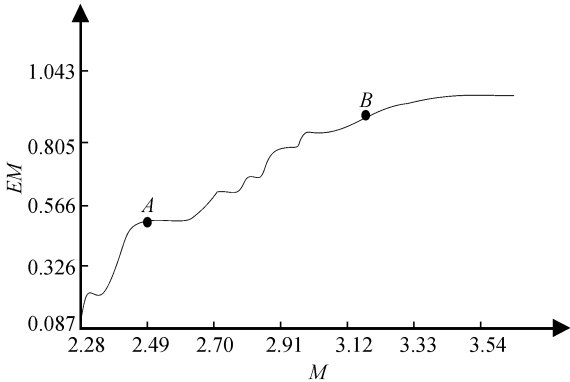


图 2 华北地区经 $\gamma=0.5$ 的 Box-Cox 变换地震波动强度序列经验分布图

Fig.2 Empirical distribution map of the sequence of seismic wave intensity in North China based on Box-Cox transformation with $\gamma=0.5$

由图 2 可以看出,数据状态变动了 2 次,以 A、B 为界点分析时,可明显看出图是由三段近线性的结构组成,根据这两个门限点实施数学建模。A 点和 B 点的经验分布估值分别是 0.458 和 0.895,基于 $\gamma = 0.5$ 的 Box-Cox 变换得到对应为 2.6 和 3.0 的地震波动强度,开方预处理变化对应的则分别是 2.3 和 2.5,在构建地震波动强度序列的门限自回归模型

$$x_n = \begin{cases} 2.081 + 0.106x_{n-1} & (x_{n-14} \leq 2.3) \\ 1.220 + 0.262x_{n-1} + 0.214x_{n-2} & (2.3 < x_{n-14} \leq 2.5) \\ 3.396 - 1.448x_{n-1} + 0.938x_{n-2} & (x_{n-14} > 2.5) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $n = (1, 2, 3, \cdots, N)$ 。

1.3 分析地震波动强度序列门限自回归模型的极限循环和振荡

将式(2)描述的地震波动强度序列门限自回归模型进行整理和制定规则:

$$x_n = 2.081 + 0.106x_{n-1} \quad (3)$$

$$x_n = 1.220 + 0.262x_{n-1} + 0.214x_{n-2} \quad (4)$$

$$x_n = 3.396 - 1.448x_{n-1} + 0.934x_{n-2} \quad (5)$$

以上(2.1, 2.3]、(2.3, 2.5]、(2.5, 2.8] 三个空间分别用区间 I、II 和 III 描述,对式(3)、(4)和(5)进行非齐次通解依次得到式(6)、(7)和(8):

$$x_n = 0.106^n c_1 + c_2 \quad (6)$$

$$x_n = 0.612^n D_1 + (-0.350)^n \cdot D_2 + D_3 \quad (7)$$

$$x_n = 0.483^n E_1 + (-1.933)^n \cdot E_2 + E_3 \quad (8)$$

通过式(6)、(7)可以得出其有指数收敛的特点,式(3)具有较高的非齐性参数,空间 I 中的 n 与 x_n ,在某一瞬间可突破空间的约束进入 II 和 III。式(8)具有二项组成且第二项发散特点,朝着大、小不同方向发散。

设想在某个 n 为奇数的 x_n 中, x_n 进入区间 III,符合式(8),则第 $(n+1)$ 个地震的序号 $(n+1)$ 是偶数,根据式(8)得出,属于区间 III 的 x_{n+1} 还在增长,随着序号是奇数的第 $(n+2)$ 个地震波动强度进入区间 I 或 II,式(8)呈现快速收敛现象。若是进到区间 II,即符合式(7),由于式(7)的收敛速度较慢,依其变化发展,地震波动强度落到区间 I,符合式(6)。其地震波动强度可以根据此时非齐性参数的修改而回到区间 II 或 III,到区间 II 也会平缓落到区间 I,但到区间 III 又重复以上变化,这样反复变化,具有周期性循环的特点,表现出极限循环^[10]。大概过程可以通过区间号进行阐述:

III $\rightarrow$ II $\rightarrow$ I $\rightarrow$ III 或 II $\rightarrow$ III $\rightarrow$ I $\rightarrow$ III
延迟 d 的可能解释:延迟 d 在门限建模中起到

时的开方预处理门限值选用 2.3 和 2.5。
1.2 地震波动强度序列的门限自回归建模
依据 1.1 节获取的门限值,基于 AIC 最小准则、最小残差平方以及内符趋势检验等方法对不同预处理地震波动强度序列进行对比^[9],获取与原始序列最匹配的地震波动强度序列门限自回归模型为:

关键作用,通过建模操作中局部极小 AIC 相应的延迟与准周期得到相应的周期,如表 1 所列。

表 1 局部延迟 d 与地震活动周期对应关系

Table 1 Corresponding relationship between local delayed d and earthquake activity cycle

地震区	华北地区			
周期(延迟)	10			
局部延迟	0	5	9	15
合适的周期	0	0.5	1	1.5

上述方法实现了地震强度变化的初步分析,但是未考虑到地震波动强度的时间特征,使得数值拟合结果精度较低。因此,文章采用基于均生函数数学建模方法拟合地震波动强度的时间序列,综合考虑地震波动强度的时间序列特征,实现地震强度波动的准确模拟。

1.4 基于均生函数的地震波动强度序列的数学模拟模型

本论述对地震波动强度时间序列根据周期性外延特点进行多步外推,通过均生函数和方差分析等数学建模方法,双评分准则与增加分级拟合率条件下残差和波数的平衡^[11],将地震波动强度序列均生函数的数学模型进行拟合,获取地震波动强度的时间序列,增强地震波动强度变化数学建模的精度。

1.4.1 用均生函数构造地震波动强度时间序列
在时间序列分析中,自回归模型主要建立在邻接时刻的序列关系上,但均生函数可基于序列的周期记忆,在另一个角度建模,利用建立时间序列实现周期函数回归。文章用均生函数构造地震波动强度时间序列为:

$$x(t) = \{x(1), x(2), \cdots, x(N)\} \quad (9)$$

式中: $t = 1, 2, 3 \cdots N$,样本量用 N 来表示,则均生函数可写成:

$$\bar{x}_L(i) = \frac{1}{n_L} \sum_{j=0}^{n_L-1} x(i+jL) \quad (i=1,2,3,\dots,L, 1 \leq L \leq M) \quad (10)$$

在式(10)中,符合 $n_L \leq \frac{N}{L}$ 的最大整数是 n_L ,不大于 $\frac{N}{2}$ 的最大整数是 M 。

为获取均值生成函数, L 值需在 1 到 M 范围内选取,该函数用三角矩阵描述:

$$H = \begin{bmatrix} \bar{x}_1(1) & \bar{x}_2(1) & \bar{x}_3(1) & \cdots & \bar{x}_M(1) \\ & \bar{x}_2(2) & \bar{x}_3(2) & \cdots & \bar{x}_M(2) \\ & & \bar{x}_3(3) & \cdots & \bar{x}_M(3) \\ & & & \ddots & \\ & & & & \bar{x}_M(M) \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据式(11)可以得出,时间序列经过特定时间间隔的均值计算后形成了均值生成函数。

利用均值生成函数根据周期 ($L=1,2,\dots,M$) 循环外推形成延拓序列^[12],形成的新序列在特点的时期内可以用式(12)描述:

$$x_L(t) = \bar{x}_L \left[i - \text{INT} \left(\frac{i-0.5}{L} \right) \times L \right] \quad (i=1,2,\dots,N \quad L=1,2,\dots,M) \quad (12)$$

1.4.2 基于双评分准则选取拟合周期

“趋势”和“方向”的大致准确性是地震波动强度数值模拟中的关键指标。要想达到这一指标,以往的 F 检验、AIC 和 BIC 准则等方法很难做到^[13]。根据数量预报评分与趋势预报评分的角度获取变量和阶数的方法即是双评分准则 CSC (Couple Some Critention),通过隐式表现为: $CSC = S_1 + S_2$ 。 S_1 、 S_2 分别代表数量评分(精评分)和趋势评分(粗评分),精评分与粗评分的和最小便是双评分准则^[14],具体表示为:

$$CSC_1 = \left(1 + \lambda \frac{N}{N_k} \right) Q_k \quad (13)$$

式中:样本量、平均残差平方和与趋势评分分别用 N 、 Q_k 和 N_k 表示:

$$Q_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(t) - \bar{x}_L(t)]^2 \quad (14)$$

趋势评分在考量升、平、降 3 种趋势下可用式(15)表示:

$$N_k = \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \frac{1}{2} |Cu[\Delta x(t)] - Cu[\Delta \bar{x}_L(t)]| \right\} \quad (15)$$

式中:

$$\Delta x(t) = x(t+1) - x(t),$$

$$\Delta \bar{x}_L(t) = \bar{x}_L(t+1) - \bar{x}_L(t)$$

$$Cu[\Delta x(t)] = \begin{cases} 1 & \Delta x(t) > u \\ 0 & \Delta | \Delta x(t) | \leq u, u > 0 \\ -1 & \Delta x(t) < -u \end{cases} \quad (16)$$

式中:判定趋势的标准用 u 表示,数量预报拟合与趋势预报拟合的权重用调整系数 λ 表示;二项权重一样大时, $\lambda = 1.0$,趋势预报拟合占的比重大时, $\lambda > 1.0$,在地震的波动强度变化建模中 λ 值的大小十分重要,根据周期的差异,可得到其对应的序列^[15],通过双评分准则得到 CSC_1 ,一级拟合时,拟合周期选择为 CSC_1 最低值时的周期。

2 实验分析

2.1 华北地震区半年度地震趋势的数值仿真

趋势演变的特征用 2005—2016 年华北地震区半年发生的最大地震波动强度表示,通过 3 点滑动平均法对已按时序排列的地震波动强度数字阵列实施整理,得到以下数字信息阵列:

4.9 5.0 5.0 5.0 4.8 5.0 4.9 5.0 4.6 4.3 4.4 5.6
6.4 6.7 5.7 5.1 4.9 5.0 5.1 5.0 5.3 5.2 5.4 4.9
5.3 5.3 5.2 4.8 4.8 5.1 4.8 4.7 4.6 4.5 4.6 4.5
4.7 4.5 4.7 4.9 5.0 4.9 4.7 4.4 4.3 3.8 3.9 3.8
4.4 4.4 4.6 4.1 4.2 4.3 4.4 4.0 4.2 4.0 4.1 3.9
4.6 4.7 4.7 4.3 4.2 4.3 4.4 3.9 4.2 4.6 4.7 4.3
4.1 4.0 4.0

实验统计华北地震区半年度本论述方法参数,结果如表 2 所列。

根据表 2 能够看出,本论述方法提出的地震趋势模型的 21 个数据中,延迟系数是 15 的有 8 个、是 13 的有 5 个,可以看出延迟系数有着明显的分布特征。本论述方法模拟的地震波动强度与实测地震波动强度最大的误差是 0.3,平均误差约为 0.18,证明了本方法的准确性。对破坏性地震的判断中,本论述方法由于存在 0.1 的级别判断误差,导致存在一次破坏性地震的误判,在以后的研究中,仍需加强地震波动强度预测的准确性研究。

将本论述方法与文献[5]方法进行对比,图 3 是年度地震波动强度模拟值和实测地震波动强度对比图。其中年份顺序由 1~23 依次为 2005 年上半年、2005 年下半年,一直到 2016 年上半年的 23 个年份数据。由图 3 可以看出,实测值与分析值的拟合程度非常好,可以看出本方法对地震波动强度的数值模拟有较高的准确性。而同样条件下,文献[5]中

表 2 华北地震区半年度本论述方法建模模型参数及模拟结果分析

Table 2 Parameters and simulation results analysis of semi-annual model in North China by the proposed method

时间	模型 分层数	模型 结束	残差	延迟 系数	分析地震波 动强度/级	实测地震波 动强度/级	误差	破坏性地震 判断及准确性
2005 年上半年	2	9	0.3	13	4.8	5.0	0.2	是(准确)
2005 年下半年	2	9	0.3	13	4.2	4.0	0.2	否(准确)
2006 年上半年	2	9	0.3	13	4.3	4.2	0.1	否(准确)
2006 年下半年	2	9	0.3	13	4.2	3.7	0.3	否(准确)
2007 年上半年	2	9	0.3	13	4.8	4.7	0.1	是(准确)
2007 年下半年	2	9	0.3	14	3.5	3.5	0.0	否(准确)
2008 年上半年	2	7	0.3	14	3.9	4.0	0.1	否(准确)
2008 年下半年	2	7	0.4	15	4.5	4.3	0.2	否(准确)
2009 年上半年	2	9	0.3	14	5.1	5.4	0.3	是(准确)
2009 年下半年	2	4	0.5	15	4.3	4.5	0.2	否(准确)
2010 年上半年	2	7	0.5	15	4.1	4.3	0.3	否(准确)
2010 年下半年	2	7	0.4	15	4.2	4.1	0.1	否(准确)
2011 年上半年	2	7	0.4	15	4.9	5.0	0.1	是(准确)
2011 年下半年	2	7	0.4	15	3.7	3.9	0.2	否(准确)
2012 年上半年	2	7	0.4	15	4.5	4.3	0.2	否(准确)
2012 年下半年	3	4	0.5	4	3.8	3.5	0.3	否(准确)
2013 年上半年	3	4	0.4	5	4.6	4.7	0.1	否(不准确)
2013 年下半年	3	4	0.4	5	5.2	5.5	0.3	是(准确)
2014 年上半年	3	4	0.5	4	3.7	3.9	0.2	否(准确)
2014 年下半年	3	6	0.4	15	3.7	3.6	0.1	否(准确)
2015 年上半年	3	4	0.5	4	4.9	4.8	0.2	是(准确)
2015 年下半年	3	6	0.5	15	3.9	3.7	0.2	否(准确)
2016 年上半年	3	6	0.5	4	3.7	3.6	0.3	否(准确)

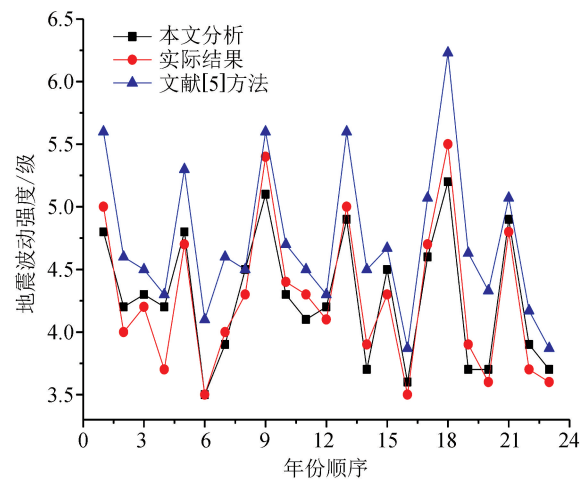


图 3 地震波动强度模拟值与实测地震波动强度

Fig.3 Simulated and measured values of seismic wave intensity

方法与实际观测值的误差较大,准确度低,不具有实际应用性。

2.2 大陆地区地震最大地震波动强度数值模拟

实验对 2013—2015 年的大陆地区地震通过本方法进行数值模拟,根据三组不在一个时间段的数据进行实验,检测到的本论述方法最大地震波动强度模拟结果如表 3 所列。

通过上表中的仿真结果能够得出,本论述方法获取的最大地震波动强度模拟值比较接近,说明本方法稳定性强。

3 结论

本论述为了解决以往未分析地震序列时间属性的问题,提高地震波动强度变化分析的准确度,提

表 3 最大地震波动强度数值仿真结果

Table 3 Numerical simulation results of maximum seismic wave intensity

资料时段	趋势仿真结果			数值仿真结果		
	2013 年	2014 年	2015 年	2013 年	2014 年	2015 年
2004—2010 年	下降			6.1		
2004—2011 年	稳定	上升		6.5	8.7	
2004—2012 年	稳定	上升	下降	6.7	9.4	6.8
均值	稳定			6.5		

出新的地震波动强度变化数学建模分析与仿真方法。依据地震波动强度序列的经验分布得到门限自回归模型的门限值,并且依据 AIC 最小准则、最小残差平方以及内符趋势检验等方法比较不同预处理地震波动强度序列,获取与原始序列最匹配地震波动强度序列门限自回归模型,对该模型极限循环以及振荡特征进行了研究,获取地震波动强度变化的初步模拟结果。再采用基于均生函数的地震波动强度序列的数学拟合模型,对地震波动强度进行精确分析。通过两级模拟过程,极大提高了地震波动强度变化数值模拟精度,同时在第二级模拟过程中考虑了地震波动强度的时间属性,并通过实验充分验证了本方法的有效性和准确性。

参考文献(References)

- [1] 艾挥,吴刚,冯文强,等.不同强度地震波作用下单滑动面滑坡的变形机理[J].中国科技论文,2016,11(1):100-104.
AI Hui, WU Honggang, FENG Wenqiang, et al. Research on the Deformation Mechanism of Single Sliding Surface Landslide Underseismic Waves of Different Intensity[J]. China Sciencepaper, 2016, 11(1): 100-104.
- [2] 李孝波,薄景山,万卫,等.基岩地形对地震动影响研究[J].岩土工程学报,2017,39(3):460-468.
LI Xiaobo, BO Jingshan, WAN Wei, et al. Study on Influence of Bedrock Topography on Ground Motion[J]. Journal of Rock Engineering, 2017, 39(3): 460-468.
- [3] 周辉.地震数据中杂波干扰数据的优化检测仿真研究[J].计算机仿真,2016,33(5):326-329.
ZHOU Hui. Optimization of Clutter Interference Data in Seismic Data Detection Simulation Research[J]. Computer Simulation, 2016, 33(5): 326-329.
- [4] 王旭,吕俊军.不同声源深度产生海底地震波仿真分析[J].舰船科学技术,2017,39(11):72-76.
WANG Xu, LÜ Junjun. Simulation Analysis of Seabed Seismic Wave Generated by Different Depth of Sound Sources[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(11): 72-76.
- [5] 邓小英,胡健,李月,等.一种新的基于卡尔曼滤波的地震记录同相轴跟踪方法及性能分析[J].地球物理学报,2014,57(1):270-279.
DENG Xiaoying, HU Jian, LI Yue, et al. A New Tracking Approach of the Seismic Record Event Based on Kalman Filtering and Its Performance Analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(1): 270-279.
- [6] 纪金豹,张硕玉,李芳芳,等.基于EASY5地震模拟振动台控制系统仿真[J].机床与液压,2016,44(1):140-142.
JI Jinbao, ZHANG Shuoyu, LI Fangfang, et al. Simulation of Earthquake Simulation Shaking Table Control System Base on EASY5[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(1): 140-142.
- [7] 娄亚龙,刘永,李向阳,等.某汕尾矿库地震和渗流耦合作用下稳定性研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(5):79-83.
LOU Yalong, LIU Yong, LI Xiangyang, et al. Study on Stability of a Certain Uranium Tailings under Coupling Effect of Earthquake and Seepage[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(5): 79-83.
- [8] 胡广霞,段晓瑞.危险货物集装箱堆场爆炸地震效应对地下结构的安全影响分析[J].中国安全生产科学技术,2017,13(4):142-147.
HU Guangxia, DUAN Xiaorui. Analysis on Safety Influence of Seismic Effect by Explosion in Container Yard of Dangerous Goods on Underground Structure[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(4): 142-147.
- [9] 刘瑜俊,柏彬,朱海峰,等.统一潮流控制器阀厅微正压环境的建立和管理策略[J].电力工程技术,2015,34(6):61-64.
LIU Yujun, BAI Bin, ZHU Haifeng, et al. Establishment and Management Strategy of the Micro-positive Pressure in the Valve Hall of UPFC[J]. Electrical Power Engineering Technology, 2015, 34(6): 61-64.
- [10] 李立云,刘晓晓,杜修力,等.埋地管道地震响应的数值仿真模型分析[J].地震工程与工程振动,2015,1(6):106-113.
LI Liyun, LIU Xiaoxiao, DU Xiuli, et al. Analysis on Numerical Simulation Model for Seismic Response of a Buried Pipeline[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 1(6): 106-113.
- [11] 陈克坚,曾永平,樊启武,等.铁路桥梁近断层地震响应与地震强度相关性[J].铁道工程学报,2017,34(10):60-65.
CHEN Kejian, ZENG Yongping, FAN Qiwei, et al. The Correlation on Near-fault Seismic Response of Railway Bridge and Ground Motion Intensity Measure Index[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(10): 60-65.
- [12] 刘晶波,谭辉,宝鑫,等.土-结构动力相互作用分析中基于人工边界子结构的地震波动输入方法[J].力学学报,2018,50(1):32-43.
LIU Jingbo, TAN Hui, BAO Xin, et al. The Seismic Wave Input Method for Soil-structure Dynamic Interaction Analysis Based on the Substructure of Artificial Boundaries[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(1): 32-43.
- [13] 冯吉浩,曹丹平,秦海旭,等.基于波动方程正演模拟的多尺度地震资料反射特征分析[J].地球物理学进展,2016,31(3):1058-1065.
FENG Jihao, CAO Danping, QIN Haixu, et al. Analysis of Multi-scale Seismic Data Reflection Characteristics Based on Wave Equation Forward Modeling[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(3): 1058-1065.
- [14] 李章波.基于波动方程和地震照明度的渝西山地煤炭资源二维地震勘探研究[J].矿业安全与环保,2017,44(2):84-87.
LI Zhangbo. Research on 2D Seismic Exploration for Mountainous Coal Resources in Western Chongqing Area Based on Wave Equation and Seismic Illumination[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2017, 44(2): 84-87.
- [15] ZHANG X, SONG S, WU J. Oscillations, Fluctuation Intensity and Optimal Harvesting of a Bio-economic Model in a Complex Habitat[J]. Journal of Mathematical Analysis & Applications, 2016, 436(2): 692-717.