吕扬,宋英培.地震波动强度非平稳特征提取数学建模分析[J].地震工程学报,2020,42(1):116-122.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.116

LÜ Yang, SONG Yingpei. Mathematical Modeling Analysis of Non-Stationary Feature Extraction of the Seismic Wave Intensity [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1):116-122.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.116

地震波动强度非平稳特征提取数学建模分析

吕 扬^{1,2}, 宋英培³

(1. 江西财经职业学院 基础课教学部,江西 九江 332000;
2. 江西师范大学 数学与信息科学学院,江西 南昌 330022;
3. 九江学院 药学与生命学院,江西 九江 332005)

摘要:地震对人类生活安全有很大的威胁,对建筑结构有明显的影响,研究地震波动强度非平稳特征可为地震的预防提供参考。研究地震波动强度非平稳特征提取模型,分别设定确定性参数和随机参数的取值。对地震波动强度非平稳特性进行傅里叶分析,根据分析结果选取数学模型,并对模型参数进行设定;将记录的地震波动强度所对应的数振幅谱进行分解,拆分成一组不同尺度的分量,并对其重组创建连续分量,提取地震波振幅谱;利用地震波的振幅谱和相位谱之间的关系对地 震波动强度非平稳特征进行提取。经过仿真实验证明,本方法提取地震波动强度非平稳特征的准确度更高,对分析高分辨率地震资料具有重要意义。

关键词:地震波动强度;非平稳特征;数学建模;特征提取

中图分类号: P631 文献标志码:A 文章编号: 1000-0844(2020)01-0116-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.116

Mathematical Modeling Analysis of Non-Stationary Feature Extraction of the Seismic Wave Intensity

LÜ Yang^{1,2}, SONG Yingpei³

(1.Basic Course Teaching Department, Jiangxi Vocational College of Finance and Economics, Jiujiang 332000, Jiangxi, China;
 2.College of Mathematics and Information Science, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, Jiangxi, China;
 3.College of Pharmacy and Life, Jiujiang University, Jiujiang 332005, Jiangxi, China)

Abstract: An earthquake considerably threatens the safety of human life and obviously impacts the building structure. Studying the non-stationary characteristics of the earthquake wave intensity can provide a reference for earthquake prevention. Herein, the non-stationary feature extraction model of the seismic wave intensity is studied, and the deterministic and random parameters are set. Further, the non-stationary characteristics of the seismic wave intensity are analyzed based on the Fourier transform. Subsequently, a mathematical model is selected according to the analysis results, and the model parameters are set. The seismic amplitude spectra corresponding to the recorded seismic wave intensity are decomposed into a set of components on different scales, and continuous components can be obtained by reor-

收稿日期:2018-12-21

基金项目:国家自然基金项目(31760392)

第一作者简介:吕 扬(1981一),女,江西九江人,副教授,研究方向:数学建模。E-mail:lvyang220196@yeah.net。

ganizing them; subsequently, the seismic wave amplitude spectrum is extracted. The relation between the amplitude and phase spectra of a seismic wave is used to extract the non-stationary characteristics of the seismic wave intensity. The simulation results denote that the proposed method is more accurate in extracting the non-stationary features of the seismic wave intensity when compared with the remaining methods; therefore, the proposed method is of considerable significance for analyzing high-resolution seismic data.

Keywords: seismic wave intensity; non-stationary characteristics; mathematical modeling; feature extraction

0 引言

地震被称为地动、地振动,是地壳在释放能量时 发生震动形成地震波的一种自然现象。地震产生原 因就是地球上各板块之间互相碰撞,造成地球板块 内部和边缘部分发生错动、破损和开裂^[1]。地震波 动强度非平稳特征是地震波动的重要特征,主要呈 现地震波动在整个持续过程中峰值时刻到来的早 晚、能量变化的快慢,基于地震波动强度非稳定性创 建数学模型,能够准确地对地震波动情况进行准确 分析。当前阶段,如何准确提取地震波动强度非稳 定性特征是首要解决的问题^[2]。

针对地震波动强度的非平稳性特征提取,国内 现有的方法可分为以下几类:

(1)钟明寿等^[3]提出一种基于改进匹配追踪的 地震波动强度非平稳特征提取方法。该方法首先将 获取到的地震波动强度信号进行 Hibert 变换,变换 成复数信号;并计算地震波动信号的短时频率相位 参数,然后对其进行子波分解,最后通过分解后的信 号实现对地震波动强度非平稳特征的提取。该方法 能够有效地获取地震波动强度的时频信息,但是该 方法的特征提取精确度较差,存在较大误差。

(2)贾宏宇等^[4]运用三角级数方法创建了一种 地震波动强度非平稳特征提取方法。首先设计出地 震反应谱,并将其转换成当量功率谱;针对地震波动 的多维性,将当量功率谱密度函数矩阵变成三维;然 后添加包络函数和梯形窗口连接,采用傅里叶变换 方式将地震波动强度进行合成;第三步将各方向的 地震波动时程进行逆转换,变成加速度反应谱,并与 目标特征反应谱进行对比,采用时域方式将幅值进 行迭代,以达到修正幅值的目的,得出地震波动强度 的变化曲线;最后,将目标反应谱和设计的反应谱进 行对比,得到地震波动强度非平稳特征。该方法能 够准确地提取出目标特征,但是该方法运行步骤较 多,运行所需时间较长,效率低。

(3) 刘章军等^[5]引入地震波动的功率谱密度函

数,创建地震波动强度非平稳特征提取模型,并对模型参数的取值进行计算。应用非平稳特征的谱表示——随机函数方法,对较为完整概率的地震波动强度非平稳变化过程的时程进行集合,进而完成对目标特征的提取。该方法能够精确地实现对目标特征的提取,但是该方法存在一定局限性,可信度较低。

(4) 邢浩洁等^[6]研究出一种配备高阶数值格式 的地震波动强度非平稳特征分析提取方法。该方法 通过谱单元离散基岩和地壳覆盖岩土体,创建各个 单元的波动方程,并在地壳内安插投射人工边界,模 拟地震波动,运用切比雪夫正交多项式创建高阶单 元位移的模式,得到地震波动发生过程,采用中心差 分法结合投射人工边界,推导出地震波动强度非平 稳特征,并对其进行提取。该方法在安装设备时,需 要大量的成本,且需要人工操作,对操作人员的人身 安全不能保证。

针对上述传统方法存在的问题和不足之处,提 出一种地震波动强度非平稳特征提取数学建模方 法。本文方法通过创建数学模型,对地震波动强度 非平稳特征进行分析和提取。通过仿真实验证明, 本文方法不但可以弥补传统方法的不足之处,而且 对地震波动分析的较为透彻,目标特征提取效果 较好。

1 地震波动强度非平稳特征提取

1.1 强度非平稳模型

通过 Fourier 分析地震波动,波动强度变化与 振幅和相位角的叠加一致^[7]。在 Fourier 分析中, 既可以通过振幅谱,又可以通过功率谱来显示波动 过程中的能量变化。地震波动过程中谐波分量的峰 值会出现提前以及时延两种状况,可以通过相位角 表示。该相位角本身无规律,通过下述证明发现,如 果先将相位角 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{N/2-1}$ 依次相减作差,即:

 $\Delta \varphi_{k} = \varphi_{k+1} - \varphi_{k}, \ k = 1, 2, \cdots, N/2 - 2$ (1)

再统计 $\Delta \varphi_k$ 的频度分布,可以发现频度分布图 的形状和地震波动的形状很相似。若各个相位角之间的差 $\Delta \varphi_k$ 是已知的,那么通过式(1)可得出:

 $\Delta \varphi_{k+1} = \varphi_k + \Delta \varphi_k, \ k = 1, 2, \cdots, N/2 - 2 \quad (2)$

相位波可以分为强度平稳与不平稳状况下的 两种,相位谱与相位角均相似,其中相位角呈现均匀 分布,因此,对于 H 组数据之间的异同体现的并不 明显,但相位角差值会形成相位差分谱。该分谱形 状与强度包线形状的变化规律一致,在峰值或是"宽 窄"两种形状变化上,均可呈现出一致的变化规 律。通过设定相位角 *q*₁,计算每个相位角的对应 值,同时可生成相对应的相位波。如图 1 所示。



Fig.1 Phase wave of seismic record

通过图 1 可以看出,时域上地震波动的外包线 形状以及频域上相位角差值频度分布均可表示地震 波动的非平稳性能,其中外包线形状与主观影响关 联较大,而相位差频度受外界因素影响较小。因此, 采用相位差分谱表示地震波动强度非平稳特征较为 合理,并且能够反映出地震波动的特性。

相位角表现了各分量波形的提前出现或延迟出现。波形提前出现时,该分量的相位角为正;波形延迟出现时,该分量的相位角为负。地震波动的相位 差分谱通常采用偏峰型分布,适用于对数正态分布 的描述^[8]。采用对数正态分布的概率密度函数建立 地震波动强度非平稳特征模型,可由下式进行表示:

$$f(t) = I_0 \cdot \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi} \cdot t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$
(3)

式中: I_0 表示归一化系数; μ 和 σ 表示该模型的参数。其中, μ 表示对曲线峰值的控制参数,随着 μ 的增大,曲线峰值会后移, σ 表示曲线"间距"的控制参数,随着 σ 的增大,曲线的下降段越平缓。曲线峰值 t_p 和这两个参数之间存在以下关系:

$$t_{p} = e^{\mu - \sigma^{2}}$$
 (4)
曲线"宽窄"S 和这两个参数之间存在以下关

系:

$$S = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2}$$
(5)

式中:S 越大,曲线跨度越大。

该模型可以用于时域上的强度包线函数、频域 上的相位差分谱,通过该方法可以准确地表达地震 波动强度非平稳特征^[9]。通过该模型,可分析时域 强度包线函数与频域相位差分谱,通过相位差分谱 可生成接近于天然波形的地震波,该人工波形可准 确描述地震强度非平稳性。

1.2 地震波动强度非平稳特征的提取

地震波动强度非平稳特征的褶积模型表达式 为:

 $x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t - \tau, v) r(\tau) d\tau = w(t, v) * r(t)$ (6) 式中: * 表示卷积; x(t) 表示地震波动强度非平稳 记录; w(t, v) 代表时变地震波; r(t) 表示反射系数 序列。

通过记录地震波动,分析波动强度的非平稳性 能特征,而对于时频的分析是具有代表性地震波信 号在每个时刻所处的频率成分,可将其作为载体研 究地震波动强度非平稳特征,分析地震波动强度非 平稳记录,充分表达出非平稳特征。通过广义 S 变 换,转换地震波动强度波动记录至时频域,窗函数表 达方式为:

$$G(t,f) = \frac{\lambda |f|^{p}}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-\lambda^{2} f^{2p} t^{2}}{2}\right)$$
(7)

式中:p 表示比 0 大的调节因子。

地震波动强度非平稳记录 x(t) 的时频谱表达式为:

$$NGST(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot G(t - \tau, f) \times \exp(-i2\pi ft) dt, f \neq 0$$
(8)

根据式(5)提到的地震波动强度非平稳特征的 褶积模型,非平稳特征记录可以表示成时变地震波 和发射系数序列的褶积。依据时域褶积与频域相乘 的关系,对式(5)中等式两边同时进行时频变换,那 么地震波动强度非平稳记录的时频谱可以通过时变 地震波和反射系数序列时频谱相乘得到的乘积进行 表示。表达式为:

$$\hat{s}_{g}(t,f) \approx \hat{w}(f) \alpha(t,f) \hat{r}_{g}(t,f)$$
(9)

式中: $\hat{s}_{g}(t,f)$ 代表地震波动强度非平稳记录经过 时频变换得到的时频谱; $\hat{r}_{g}(t,f)$ 代表反射系数序 列由时频变换得到的时频谱; $\hat{w}(f)$ 代表地震波的 Fourier 谱; $\alpha(t,f)$ 代表衰减因子; $\hat{w}(f)\alpha(t,f)$ 代 表地震波动发生过程中在 t 时刻的 Fourier 谱,就是 时变地震波的时频谱。用 $W(\tau, f)$ 表示式(8) 中的 $\hat{w}(f)\alpha(t, f)$,用 $X(\tau, f)$ 和 $R(\tau, f)$ 分别代表地震 波动非平稳记录和反射系数序列的时频谱,有以下 关系;

$$X(\tau, f) = W(\tau, f) \cdot R(\tau, f)$$
(10)

式中:X(τ,f)、W(τ,f)和 R(τ,f)分别代表地震 波动非平稳记录、地震波和反射系数的频谱随时间 变化的情况^[10]。非周期信号频谱可通过处理地震 波信号的方式不同加以表述,地震波动强度非平稳 信号可通过其振幅谱和相位谱进行表示。表达式 为:

$$F(\mathbf{j}w) = |F(\mathbf{j}w)| e^{\mathbf{j}\varphi(w)}$$
(11)

式中:|F(jw)|和 $\varphi(w)$ 分别表示频谱函数F(jw)的模和相位, $w = 2\pi f$ 。此时可将式(9)变成以下形式:

 $\mid X(\tau, f) \mid \bullet \exp(j\varphi_x(\tau, f)) = \mid W(\tau, f) \mid \bullet$

 $|R(\tau,f)| \cdot [j(\varphi_w(\tau,f) + \varphi_r(\tau,f))]$ (12) 式中:j表示虚数符号; $|X(\tau,f)|$ 、 $|W(\tau,f)|$ 和 $|R(\tau,f)|$ 分别表示地震波动非平稳记录、地震波 和反射系数的振幅谱; $\varphi_x(\tau,f)$ 、 $\varphi_w(\tau,f)$ 和 $\varphi_r(\tau,f)$ 分别代表地震波动非平稳记录、地震波和反射系 数的相位谱。对上式的两边进行取对数计算,那么 地震波动非平稳记录、地震波和反射系数的对数振 幅谱的表达式为:

 $\ln \mid X(\tau, f) \mid = \ln \mid W(\tau, f) \mid + \ln \mid R(\tau, f) \mid$ (13)

式中: $\ln | X(\tau, f) |$ 代表地震波动强度非平稳记录 的对数振幅谱; $\ln | R(\tau, f) |$ 表示反射系数的对数 振幅谱,为高频信号; $\ln | W(\tau, f) |$ 表示时变地震波 的对数振幅谱,为低频信号。

将地震波动强度非平稳特征记录的对数振幅谱 进行分解,拆分成具有不同波动尺度的固有模态函 数(*IMF*)分量,*IMF*₁,*IMF*₂,...,*IMF*_n。振幅谱 会对 *IMF*产生影响,其中反射系数振幅谱影响较 小,地震波动振幅谱影响较大,随之 *IMF*分量中振 幅能量会产生同样的变化趋势。通过连续光滑的 *IMF*分量重建地震波对数振幅谱,如下式:

$$\tilde{y}_{k}(t) = \sum_{j=k}^{n} IMF_{j}(t) + c(t), \ (k = 2, \cdots, n)$$
(14)

式中: $y_k(t)$ 表示时变地震波对数振幅谱的估计 值。存在特定的 *IMF*分量,相比于反射系数振幅 谱产生的能量,该分量对应的地震波会产生较大振 幅能量;c(t)表示地震记录的加速度数据或强度包 线值。时变地震波动强度非平稳特征提取的目标, 就是分界 IMF 的索引值 k = j。

当震级以及震中距产生变化时,特征模型参数 也随之改变,通过近似地震参数表示形式描述两者 变化关系,即衰减模型表达为:

 $lgY = c_1 + c_2M + c_3 lg(R + R_0) + ε$ (15) 式中:Y表示模型的参数μ和σ; c_1, c_2, c_3 均表示待定 常数; ε 表示随机误差项; R_0 表示尊重距起算常数, 通常取值为 10 km。本文分场地对所有模型参数进 行了回归分析,回归原则为令下式取值最小, 即:

$$J = \sum_{i=1}^{N} \left[w_X \left(\Delta X \right)_i^2 + w_Y \left(\Delta Y \right)_i^2 \right]$$
(16)

式中:w_x和w_y表示权重系数,通过变异系数以及 相对误差加以判断;通过研究结果显示,权重系数与 回归结果之间关联较小,权重系数取值 1.0.

综上所述,通过数学模型对不同时刻的地震波 动强度记录的对数振幅谱进行分解,实现对地震波 动强度非平稳特征进行提取,克服了传统方法的不 足之处,提高了提取精度。

2 仿真实验

为了验证所提方法的可行性与可信度,在配置为:Windows 7 旗舰版,I7 双核处理器,内存 8 GB,运行内存 2 GB,3.5 GHz 主频的计算机上创建仿真实验平台,采用 Octave 软件作为实验支持,运用 Ja-va 语言对实验方法进行编程。

实验数据来源于某省地震情报相关部门,取其 2014—2018年间发生的最大地震波动强度数据当 作测试样本,在震级以及震中距区,存在的原始地震 波动信息有限,可通过结合该区域相关参数的平均 值以及衰减模型的结果值进行分析;在没有地震波 动原始信息的地震波动区域,仅依靠衰减模型取值, 根据相关性分析获取修正参数值(表1)。并对实验 对象采用传统方法中最典型的方法:三角级数方法 和功率谱密度函数提取方法,与本文方法进行实验。

表1 地震波数据

Table 1 Seismic wave data

	$M \leqslant 4.2$	$4.2 < M \le 6.0$	M > 6.0	合计
$R \leqslant 65 \text{ km}$	1 280	522	35	1 765
65 km $\!$	319	1 062	227	1 608
$R{>}200~{ m km}$	0	26	76	102
合计	1 527	1 610	338	3 475

图 2 为不同方法对地震波强度非平稳特征进行 提取的实验对比结果。





分析图 2 可知:由图像直观来看,三角级数提取 方法和功率谱密度函数提取方法与地震波动强度非 平稳特征实际值相差较大,这两种方法均存在较大 的误差,说明这两种方法的可信度较低;本文方法提 取结果与实际值的趋向走势极为相似,基本相同,主 要原因在于本文方法利用地震波的振幅谱和相位谱 之间的关系来对地震波动强度非平稳特征进行提 取,保障了提取准确度,可信度较高。

为了验证本文方法的有效性,采用三种方法对 实验对象采取进一步实验,选取查全率和查准率作 为方法的评价指标,并对实验结果进行对比(表 2)。 其中查全率是提取的地震波动强度特征占所有地震 波动强度特征的比例;查准率是提取的地震波动强

」方法的实验对比结果
方法的实验对比结果

Table 2 Experimental comparison results of

different methods			
方法	查全率%	查准率%	
三角级数	85.48	85.87	
功率谱密度函数	88.01	82.22	
本文方法	97.84	99.43	

度特征中非平稳特征的比例。

分析表 2 可知:本文方法在查全率和查准率方 面都具有较明显的优势,三角级数提取方法在三种 方法中性能最差,本文方法的查全率和查准率与三 角级数提取方法分别相差 12.36%、13.56%,与功率 谱密度函数提取方法相差 9.83%、17.21%。由此可 说明,本文方法不仅具有较高的提取准确度,而且具 有较高的有效性,提取效果较好。

本文研究地震数据来源于某油田处地震数据, 图 3(a)为原始地震波动数据,通过 15 个三分量检 波器加以采集,采样时间间隔为 0.24 ms,采样数据 为 1 000 个。其中 17~32、33~48、1~16 道分别表 述数据的 *X*、*Y*、*Z* 轴分量,根据数据较低信噪比,可 知噪声的存在掩盖了地震波动信号,对于 P 波和 S 波识别效果下降。

通过图 3(b)可得,滤除高频噪声后,地震波动 信号同相轴清晰度提升较小;通过图 3(c)可看出, 本文方法对于地震噪声起到较好抑制效果,可准确 提取地震波动信号。但是依旧存在噪声影响。





Fig.3 Comparison of weak signal extraction results of actual microseismic data

3 结束语

针对传统方法存在的地震波动特征提取效率 低、提取精度差等问题,提出地震波动强度非平稳特 征数学建模方法。该方法通过创建数学模型,利用 地震波的振幅谱和相位谱之间的关系对地震波动强 度非平稳特征进行提取。经过仿真实验证明,本文 研究的提取方法,能够准确地提取地震波动强度非 平稳特征,具有较高可信度,查全率和查准率与三角 级数提取方法分别相差 12.36%、13.56%,与功率谱 密度函数提取方法相差 9.83%、17.21%。因此本文 所述方法可为地震波动特征提取提供一定的参考价 值。将本文方法应用到弱震定位方面的性能还有待 加强,因而下一步的研究方向为,以加强对于弱震的 定位作用。

参考文献(References)

[1] 张超,颜学渊,林进军.空间相关的非平稳地震动场合成思路及 程序实现[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2017, 41(5):741-745.

ZHANG CHAO, YUAN Xueyuan, LIN Jinjun. Synthesis Thought and Program Realization of Non-stationary Spatially Variable Ground Motions[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering),2017,41 (5):741-745.

- [2] 赵岩,贾甜,周瑞鹏,地震作用下管道-土耦合结构非平稳随机振动分析[J].应用数学和力学,2018,39(5):493-505.
 ZHAO Yan,JIA Tian,ZHOU Ruipeng.Non-Stationary Radom Vibration Analysis of Coupled Pipeline-Soil Systems under Earthquake[J].Applied Mathematics and Mechanics,2018,39 (5):493-505.
- [3] 钟明寿,周辉,刘影,等.基于改进匹配追踪算法的化爆地震波 信号时频特征提取[J].爆炸与冲击,2017,37(6):931-938.
 ZHONG Mingshou, ZHOU Hui, LIU Ying, et al. Time-frequency Analysis of Explosion Seismic Signal Based on Improved Matching Pursuit [J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(6):931-938.
- [4] 贾宏宇,陈航,张克跃,等.多维多点非平稳地震波合成[J].西南交通大学学报,2017,52(4):663-670.
 JIA Hongyu, CHEN Hang, ZHANG Keyue, et al. Non-Stationary Synthesis of Multi-Dimensional and Multi-Point Seismic Waves[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2017,52(4):663-670.
- [5] 刘章军,刘增辉,刘威.全非平稳地震动过程的概率模型及反应 谱拟合[J].振动与冲击,2017,36(2):32-38.

LIU Zhangjun, LIU Zenghui, LIU Wei. Probability Model of Fully Non-stationary Ground Motion with the Target Response Spectrum Compatible [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(2): 32-38.

- [6] 邢浩洁,李鸿晶,杨笑梅.基于切比雪夫谱元模型的成层场地地 震反应分析[J].岩土力学,2017,38(2):593-600,609.
 XING Haojie,LI Hongjing, YANG Xiaomei.Seismic Response Analysis of Horizontal Layered Soil Sites Based on Chebyshev Spectral Element Model[J].Rock and Soil Mechanics,2017,38 (2):593-600,609.
- [7] 陈雪纯,张入千,王立新,基于 Wi-Fi 信号强度衰减模型的地震 埋压人员定位方法研究[J].华南地震,2018,38(4):10-16.
 CHEN Xuechun, ZHANG Ruqian, WANG Lixin. Research on Positioning Method of Earthquake Buried Personnel Based on Signal Strength Attenuation Model of Wireless Network[J].
 South China Journal of Seismology,2018,38(4):10-16.
- [8] 曲国岩,俞瑞芳.基于时-频包线的非平稳地震动合成及其对结构非线性响应的影响[J].振动工程学报,2018,31(2):198-208.
 QU Guoyan, YU Ruifang. Simulation Method of Earthquake Ground Motion Based on Frequency-dependent Amplitude Envelope Function and Its Influence on the Structural Nonlinear Responses[J].Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(2): 198-208.
- [9] 姚振亚,金国芳.多维地震动平动分量的合成[J].结构工程师, 2017,33(3):103-108.
 YAO Zhenya, JIN Guofang. Synthesis Multi-dimensional

Translational Components of Ground Motion [J]. Structural Engineers, 2017, 33(3):103-108.

[10] 李创第,柏大炼,葛新广,等.基于 C-P 谱分析设置支撑的广义 Maxwell 阻尼器系统完全非平稳地震响应[J].桂林理工大学 学报,2018,38(3):480-487.

> LI Chuangdi, BAI Dalian, GE Xinguang, et al. Analytical Method for Full Non-stationary Responses of Dissipation System with Brace-general Maxwell Damper Based on C-P Spectrum[J].Journal of Guilin University of Technology, 2018, 38 (3):480-487.