



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111551994 B

(45) 授权公告日 2023.01.17

(21) 申请号 202010393272.8

(22) 申请日 2020.05.11

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 111551994 A

(43) 申请公布日 2020.08.18

(73) 专利权人 中国地震局地球物理研究所  
地址 100081 北京市海淀区民族大学南路5号

(72) 发明人 俞瑞芳 王少卿

(74) 专利代理机构 北京煦润律师事务所 11522  
专利代理师 惠磊

(51) Int. Cl.  
G01V 1/36 (2006.01)  
G01V 1/30 (2006.01)

(56) 对比文件

- CN 110389379 A, 2019.10.29
- CN 110020400 A, 2019.07.16
- CN 101697014 A, 2010.04.21
- CN 107145750 A, 2017.09.08
- CN 101236256 A, 2008.08.06
- CN 107967240 A, 2018.04.27
- US 2017199289 A1, 2017.07.13
- JP 2008008855 A, 2008.01.17

曲国岩. 空间相关多点非平稳地震动输入对大跨结构非线性响应的影响.《中国优秀硕士学位论文全文数据库工程科技 II 辑》.2018,

审查员 陈蕤

权利要求书2页 说明书5页 附图2页

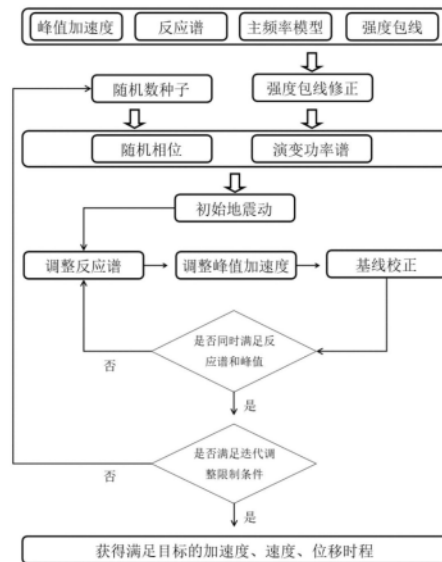
(54) 发明名称

一种匹配多目标的频率非平稳地震动拟合方法

(57) 摘要

本申请涉及一种匹配多目标的频率非平稳地震动拟合方法,包括步骤:根据目标地震动拟合参数计算演变功率谱时频包线函数;选定初始相位参数,合成初始地震动并计算小波时频谱;将目标加速度反应谱离散化处理,对全部控制点进行多轮调整并进行基线校正,直至地震反应谱和峰值加速度都满足目标限值;记录地震反应谱调整轮数,并计算满足反应谱和峰值加速度限值要求的地震动小波谱与初始地震动小波谱之间的二维相关系数;若不满足限值,则重新生成新的初始相位参数,并重复上述步骤。该方法模拟的地震动不仅能够同时匹配多个目标参数的要求,而且还能够表征特定的目标强度和频率非平稳特性。

CN 111551994 B



1. 一种匹配多目标的频率非平稳地震动拟合方法,其特征在于:包括以下步骤:

(1) 根据目标地震动拟合参数计算演变功率谱时频包线函数;计算演变功率谱时频包线函数的方法包括:利用给定地震动主频率变化函数计算频率成分随时间的分布函数,结合地震动强度包线得到时频谱等效平均强度包线,从而得到地震动的时频联合分布和地震动的演变功率谱时频包线函数;

(2) 选定初始相位参数,合成初始地震动并计算小波时频谱;

(3) 将目标加速度反应谱离散化处理,对全部控制点进行多轮调整并进行基线校正,直至地震反应谱和峰值加速度都满足目标限值;

(4) 记录地震反应谱调整轮数,并计算满足反应谱和峰值加速度限值要求的地震动小波谱与初始地震动小波谱之间的二维相关系数;

(5) 若地震反应谱调整轮数和上述二维相关系数不满足限值,则重新生成新的初始相位参数,并重复步骤(2)-(4),直至地震动反应谱调整轮数和上述二维相关系数满足限值要求,从而获得满足所有目标的地震加速度时程;

其中,在步骤(1)中,给定地震动主频率变化 $F_p(t)$ ,用下式的模型描述频率成分随时间 $t$ 的分布:

$$L(t, \omega) = \frac{\omega}{F_p(t)} e^{-\frac{\omega - F_p(t)}{F_p(t)}} \quad (1)$$

结合地震动强度包线 $E(t)$ ,可得时频谱等效平均强度包线

$$\bar{E}(t) = \left( \frac{E^2(t) \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{L^2(t, \omega_k)}{C_k^2} S(\omega) d\omega} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

式中 $\omega$ 为自振圆频率; $C_k = \max[E^2(t) L(t, \omega_k)]$ ;  $S(\omega)$ 为目标地震动的近似功率谱,由目标加速度反应谱 $S_a^T(\omega)$ 计算得到:

$$S(\omega) = \frac{\xi}{\pi\omega} \cdot (S_a^T(\omega))^2 \cdot \frac{1}{\ln(-\frac{\pi}{\omega T} \ln(1-P))} \quad (3)$$

式中: $\xi$ 为结构阻尼比, $T$ 为结构自振周期, $P$ 为超越概率;

由此可得地震动的时频联合分布为:

$$WB(t, \omega_k) = \bar{E}^2(t) L(t, \omega_k), k = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

地震动的演变功率谱时频包线函数为:

$$B(t, \omega_k) = \frac{WB(t, \omega_k)}{C_k}, k = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

在步骤(3)中,具体步骤包括:

将目标加速度反应谱离散为圆频率为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$ 的 $M$ 个单自由度体系;

对全部 $M$ 个控制点进行第 $i$ 轮调整:

第 $i$ 轮反应谱调整中,若对第 $k$ 个圆频率 $\omega_k$ 调整前的加速度时程为 $y_k^i(t)$ ,则调整后的加速度时程为:

$$y_{k+1}^i(t) = y_k^i(t) + \delta y_k^i(t) \quad (7)$$

式中,  $\delta y_k^i(t)$  为第  $i$  轮调整中对  $\omega_k$  进行调整的增量时程, 采用下式计算:

$$\delta y_k^i(t) = R \cdot h(t_m - t) B(t, \omega_k), t \leq t_m \quad (8)$$

上式中,  $t_m$  为单自由度体系最大反应发生的时刻;  $B(t, \omega_k)$  为演变功率谱时频包线函数;  $h(t_m - t)$  为单位脉冲响应函数, 表示为:

$$h(t_m - t) = e^{\xi \omega_k (t_m - t)} \cos(\omega_{Dk}(t_m - t) + \phi_k^i) \quad (9)$$

其中:  $\omega_{Dk} = \omega_k \sqrt{1 - \xi^2}$ ,  $\phi_k^i$  为调整时程的初始相位, 保证叠加的单位脉冲函数在  $t_m$  处取得峰值;

第  $i$  轮调整中, 若此次调整前地震动的反应谱在  $\omega_k$  与目标反应谱的差值为  $\Delta S_k^i$ , 则公式 (8) 中的增量时程振幅调整系数  $R$  由下式计算

$$\Delta S_k^i = C \cdot R \quad (10)$$

其中:

$$C = \int_0^{t_m} h^2(t_m - t) \cdot dt \quad (11)$$

将第  $i$  轮调整后的时程  $y_{M+1}^i(t)$  峰值调整为目标加速度峰值, 并进行基线校正, 然后作为第  $i+1$  轮调整的初始地震动  $y_1^{i+1}(t)$ , 进行第  $i+1$  轮调整, 直至地震反应谱和峰值加速度都满足目标限值;

在步骤 (4) 中, 采用下式计算满足反应谱和峰值加速度限值要求的地震动小波谱 CWT 与初始地震动小波谱  $CWT^0(t, \omega)$  之间的二维相关系数  $\rho_{CWT^0, CWT}$ :

$$\rho_{AB} = \frac{\sum_i \sum_j (A_{ij} - E[A])(B_{ij} - E[B])}{\sqrt{\sum_i \sum_j (A_{ij} - E[A])^2 \sum_i \sum_j (B_{ij} - E[B])^2}} \quad (12)$$

式中,  $\rho_{AB}$  为两组矩阵  $A, B$  的二维相关系数,  $A_{i,j}, B_{i,j}$  分别为  $A, B$  的第  $i$  行第  $j$  列元素;  $E[A], E[B]$  分别为  $A, B$  元素的均值。

2. 根据权利要求 1 所述的频率非平稳地震动拟合方法, 其特征在于: 在步骤 (1) 中, 目标地震动拟合参数包括地震动主频率变化、地震动强度包线、目标加速度反应谱和峰值加速度, 上述目标地震动拟合参数根据场地条件、地震地质条件分析得到。

3. 一种工程结构抗震设计的方法, 其特征在于: 该方法的地震动输入为根据权利要求 1 或 2 所述的匹配多目标的频率非平稳地震动拟合方法获得的地震加速度时程。

## 一种匹配多目标的频率非平稳地震动拟合方法

### 技术领域

[0001] 本申请涉及一种匹配多目标的频率非平稳地震动拟合方法,适用于结构抗震设计的技术领域。

### 背景技术

[0002] 地震动是由震源释放出来的地震波引起的地面运动。它是由不同频率、不同幅值在一个有限时间范围内的集合。所以通常以幅值、频率特性和持续时间三个参数来表达地震的特点。地震动强度与频率非平稳特性是指由于地震震源机制、传播过程、场地条件的复杂作用,地震动体现出的幅值和频谱随时间变化的特征。

[0003] 地震动参数是工程抗震设计的依据,不同工程对工程场地地震安全性评价的深度以及提供的参数的要求不同,这取决于工程的类型、工程的安全性、危险性以及社会影响等因素。比如对一般工业民用建筑,抗震设计规范都以基本烈度为基础来确定设防烈度,以烈度值换算成地震动峰值加速度进行抗震设计,但对一些重要工程和特殊工程如超高层建筑,大桥、大坝、核电厂等只提供峰值加速度还不能满足抗震设计要求,还必须提供地震过程的频率特性和强震动的持时等地动参数。地震动的重要工程特性至少应包括地动峰值(加速度或速度峰值),反应谱及强震持时这三项参数。地震动参数区划图展示了地区之间潜在地震危险程度的差异,设计人员可以根据地震动参数区划图上所标示的各个地区的抗震设防要求进行建设工程抗震设计。

[0004] 如图1所示,其中显示了某地实际发生过的地震加速度记录,其振幅随时间呈现先增强,然后进入平稳阶段,最后逐渐衰减的过程;频率成分随时间呈现逐渐以低频为主的趋势。从结构响应的角度看,目前广泛应用于工程实践的地震动强度包线可以近似表示能量在时间上的不均匀分布,隐含着对累积能量和持续时间的规定,将其用于结构的弹性分析一般能得到满意的结果。但已有研究表明,复杂结构的弹塑性响应对地面运动的细节特别敏感。例如,如果结构逐渐降低的频率与地震动频率含量的非平稳趋势接近时,结构响应可能因为“瞬时共振”现象的发生而被显著放大。地震动频率非平稳特性对有刚度和强度退化的结构有很大影响,并且对结构非线性响应的影响大于结构线性响应,特别是结构进入倒塌阶段。于是,基于工程实践的需要,就需要发展能够近似定量表达地震动频率非平稳特性的地震动模拟方法,获得适合于重要工程结构抗震计算的合理的地震动输入,或者获得在满足现行规范条件下对结构响应可能产生不利影响的地震动。

[0005] 但在实际工程应用中,建筑工程所在的场地条件千变万化,震源特征、地震机制、传播路径等也是因地、因时而异,从有限的实际地震记录中找到满足不同目标的强震记录十分困难。因此,为了满足重要工程抗震设计工程需求,需要发展能够同时匹配多个目标的人工地震动模拟方法。

### 发明内容

[0006] 本申请的目的是设计一种能够表征特定目标强度与频率非平稳特性的地震加速

度时程拟合方法。该方法生成的地震加速度时程,不仅能够实现对加速度反应谱、峰值加速度、峰值速度、峰值位移等多个目标参数的拟合,还能实现对地震动强度与频率非平稳特性的定量控制。本方法模拟得到的地震动可满足不同特性重要结构抗震设计的地震动输入需求。

[0007] 本申请一方面涉及一种匹配多目标的频率非平稳地震动拟合方法,包括以下步骤:

[0008] (1) 根据目标地震动拟合参数计算演变功率谱时频包线函数;

[0009] (2) 选定初始相位参数,合成初始地震动并计算小波时频谱;

[0010] (3) 将目标加速度反应谱离散化处理,对全部控制点进行多轮调整并进行基线校正,直至地震反应谱和峰值加速度都满足目标限值;

[0011] (4) 记录地震反应谱调整轮数,并计算满足反应谱和峰值加速度限值要求的地震动小波谱与初始地震动小波谱之间的二维相关系数;

[0012] (5) 若地震反应谱调整轮数和上述二维相关系数不满足限值,则重新生成新的初始相位参数,并重复步骤(2)-(4),直至地震动反应谱调整轮数和上述二维相关系数满足限值要求,从而获得满足所有目标的地震加速度时程。

[0013] 其中,在步骤(1)中,目标地震动拟合参数包括地震动主频率变化、地震动强度包线、目标加速度反应谱和峰值加速度,上述目标地震动拟合参数根据场地条件、地震地质条件分析得到。

[0014] 其中,在步骤(1)中,计算演变功率谱时频包线函数的方法包括:利用给定地震动主频率变化函数计算频率成分随时间的分布函数,结合地震动强度包线得到时频谱等效平均强度包线,从而得到地震动的时频联合分布和地震动的演变功率谱时频包线函数。

[0015] 其中,在步骤(3)中,具体步骤包括:

[0016] 将目标加速度反应谱离散为M个单自由度体系;

[0017] 对全部M个控制点进行第i轮调整;

[0018] 将第i轮调整后的时程峰值调整为目标加速度峰值,并进行基线校正,然后作为第i+1轮调整的初始地震动进行第i+1轮调整,直至地震动反应谱和峰值加速度都满足目标限值。

[0019] 本申请另一方面涉及一种工程结构抗震设计的方法,该方法的地震动输入为根据如上所述的匹配多目标的频率非平稳地震动拟合方法获得的地震加速度时程。

[0020] 本申请提出了基于瞬时能量的时频谱平均包线函数来实现对地震动频率非平稳特性的近似定量控制,并在人工地震动模拟中建立了反应谱迭代调整的限制条件。该方法模拟的地震动不仅能够同时匹配多个目标参数的要求,而且还能够表征特定的目标强度和频率非平稳特性。

## 附图说明

[0021] 图1显示了某地实际发生过的地震加速度记录曲线。

[0022] 图2显示了本申请的地震动拟合方法的流程示意图。

[0023] 图3显示了本申请实施例中的目标反应谱及实际拟合反应谱的示意图。

[0024] 图4显示了本申请实施例中拟合的目标强度包络线及加速度时程的示意图。

[0025] 图5显示了本申请实施例中拟合的目标主频率及实际主频率的示意图。

### 具体实施方式

[0026] 为使本申请的目的、技术方案和优点更加清楚明白,下文中将结合附图对本申请的实施例进行详细说明。需要说明的是,在不冲突的情况下,本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互任意组合。

[0027] 根据本申请的匹配多目标的频率非平稳地震动拟合方法,采用如图2所示的技术流程来完成。具体包括以下步骤:

[0028] (1) 根据目标地震动拟合参数计算演变功率谱时频包线函数;

[0029] (2) 选定初始相位参数,合成初始地震动并计算小波时频谱;

[0030] (3) 将目标加速度反应谱离散化处理,对全部控制点进行多轮调整并进行基线校正,直至地震反应谱和峰值加速度都满足目标限值;

[0031] (4) 记录地震反应谱调整轮数,并计算满足反应谱和峰值加速度限值要求的地震动小波谱与初始地震动小波谱之间的二维相关系数;

[0032] (5) 若地震反应谱调整轮数和上述二维相关系数不满足限值,则重新生成新的初始相位参数,并重复步骤(2)-(4),直至地震反应谱调整轮数和上述二维相关系数满足限值要求,从而获得满足所有目标的地震加速度时程。

[0033] 在步骤(1)中,目标地震动拟合参数可以包括地震动主频率变化、地震动强度包线、目标加速度反应谱和峰值加速度等参数,这些地震动拟合参数是在地震动拟合前已经规定好的参数,一般是根据场地条件、地震地质条件分析得到的已知参数,可以按照现行的抗震设计规范确定,或者按照工程设防需要确定和场地地震地质环境特点相关的特定场地的地震动设计参数。

[0034] 给定地震动主频率变化 $F_p(t)$ ,则可用下式的模型描述频率成分随时间 $t$ 的分布:

$$[0035] \quad L(t, \omega) = \frac{\omega}{F_p(t)} e^{-\frac{\omega - F_p(t)}{F_p(t)}} \quad (1)$$

[0036] 结合地震动强度包线 $E(t)$ ,可得时频谱等效平均强度包线

$$[0037] \quad \bar{E}(t) = \left( \frac{E^2(t) \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{L^2(t, \omega_k)}{C_k^2} S(\omega) d\omega} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

[0038] 式中 $\omega$ 为自振圆频率; $C_k = \max [E^2(t) L(t, \omega_k)]$ ;  $S(\omega)$ 为目标地震动的近似功率谱,可由目标加速度反应谱 $S_a^T(\omega)$ 计算得到:

$$[0039] \quad S(\omega) = \frac{\xi}{\pi \omega} \cdot (S_a^T(\omega))^2 \cdot \frac{1}{\ln(-\frac{\pi}{\omega T} \ln(1-P))} \quad (3)$$

[0040] 式中: $\xi$ 为结构阻尼比, $T$ 为结构自振周期, $P$ 为超越概率。

[0041] 由此可得地震动的时频联合分布为:

$$[0042] \quad WB(t, \omega_k) = \bar{E}^2(t) L(t, \omega_k), k = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

[0043] 地震动的演变功率谱时频包线函数为:

$$[0044] \quad B(t, \omega_k) = \frac{WB(t, \omega_k)}{C_k}, k = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

[0045] 在步骤(2)中,初始相位  $\phi_k$  可以为  $[-2\pi, 2\pi]$  范围内的随机数,初始地震动  $y^0(t)$  可由下式合成:

$$[0046] \quad y^0(t) = \sum_{k=1}^N 2B(t, \omega_k) \sqrt{S(\omega_k) \Delta \omega} \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (6)$$

[0047] 式中,  $\Delta \omega = \omega_{k+1} - \omega_k$ 。

[0048] 采用连续Morlet复小波对初始地震动  $y^0(t)$  进行小波变换,其小波时频谱为CWT<sup>0</sup>。

[0049] 在步骤(3)中,具体步骤可以包括:

[0050] (3) 将目标加速度反应谱离散为圆频率为  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$  的M个单自由度体系;

[0051] (4) 对全部M个控制点进行第i轮调整:

[0052] 第i轮反应谱调整中,若对第k个圆频率  $\omega_k$  调整前的加速度时程为  $y_k^i(t)$ ,则调整后的加速度时程为:

$$[0053] \quad y_{k+1}^i(t) = y_k^i(t) + \delta y_k^i(t) \quad (7)$$

[0054] 式中,  $\delta y_k^i(t)$  为第i轮调整中对  $\omega_k$  进行调整的增量时程,可采用下式计算:

$$[0055] \quad \delta y_k^i(t) = R \cdot h(t_m - t) B(t, \omega_k), t \leq t_m \quad (8)$$

[0056] 上式中,  $t_m$  为单自由度体系最大反应发生的时刻;  $B(t, \omega_k)$  为演变功率谱时频包线函数;  $h(t_m - t)$  为单位脉冲响应函数,可以表示为:

$$[0057] \quad h(t_m - t) = e^{\xi \omega_k (t_m - t)} \cos(\omega_{Dk} (t_m - t) + \phi_k^i) \quad (9)$$

[0058] 其中:  $\omega_{Dk} = \omega_k \sqrt{1 - \xi^2}$ ,  $\phi_k^i$  为调整时程的初始相位,保证叠加的单位脉冲函数在  $t_m$  处取得峰值。

[0059] 第i轮调整中,若此次调整前地震动的反应谱在  $\omega_k$  与目标反应谱的差值为  $\Delta S_k^i$ ,则公式(8)中的增量时程振幅调整系数R可由下式计算

$$[0060] \quad \Delta S_k^i = C \cdot R \quad (10)$$

[0061] 其中:

$$[0062] \quad C = \int_0^{t_m} h^2(t_m - t) \cdot dt \quad (11)$$

[0063] (3) 将第i轮调整后的时程  $y_{M+1}^i(t)$  峰值调整为目标加速度峰值,并进行基线校正,然后作为第i+1轮调整的初始地震动  $y_1^{i+1}(t)$ ,进行第i+1轮调整,直至地震反应谱和峰值加速度都满足目标限值。

[0064] 在步骤(4)中,记录地震反应谱调整轮数S,并采用下式计算满足反应谱和峰值加速度限值要求的地震动小波谱CWT与初始地震动小波谱CWT<sup>0</sup>(t,  $\omega$ )之间的二维相关系数  $\rho_{CWT^0, CWT}$ :

$$[0065] \quad \rho_{AB} = \frac{\sum_i \sum_j (A_{ij} - E[A])(B_{ij} - E[B])}{\sqrt{\sum_i \sum_j (A_{ij} - E[A])^2 \sum_i \sum_j (B_{ij} - E[B])^2}} \quad (12)$$

[0066] 式中,  $\rho_{AB}$  为两组矩阵A, B的二维相关系数,  $A_{i,j}, B_{i,j}$  分别为A, B的第i行第j列元素;  $E[A], E[B]$  分别为A, B元素的均值。

[0067] 在步骤(5)中,评价地震反应谱调整轮数S与  $\rho_{CWT^0, CWT}$  满足要求限值的情况,若不满足,则生成新的初始相位  $\phi_k$ ,重复步骤二、步骤三,直至满足反应谱调整轮数S与

$\rho_{\text{CWT}^0, \text{CWT}}$ 的要求,以获得满足所有目标的地震动加速度时程。

[0068] 本申请的另一方面还涉及一种工程结构抗震设计的方法,该方法的地震动输入为根据如上所述的匹配多目标的频率非平稳地震动拟合方法获得的地震加速度时程,其余步骤可以采用现有技术中成熟的方法。工程结构抗震设计的一般方法为通过工程结构的动力方程求解地震反应,即在动力方程中输入地震记录,其中的动力方程中质量、阻尼和刚度矩阵可以通过对工程结构的结构和材料分析得到。由于地震波为复杂的随机振动,所以可以通过逐步积分法求解运动方程,可获得地震持续时间内结构地震响应随时间变化的全过程,既可获得结构线性响应,又可计算强震作用下结构非线性响应。

[0069] 实施例

[0070] 某二类场地设计地震动的目标反应谱如图3中圆点所示,其特征周期 $T_g=0.4\text{s}$ ,峰值加速度 $0.2g$ 。采用三段式包络曲线约束其强度非平稳特性,如图4实线所示, $t_1=3.5\text{s}$ , $t_2=17.5\text{s}$ ,曲线下降段衰减系数 $c=0.15$ ,总持时 $t_d=40\text{s}$ ,

[0071] 采用下式描述的主频率曲线约束其频率非平稳特性:

$$[0072] \quad F_p = f_0 + pe^{-st} \sin(\omega t) \quad (13)$$

[0073] 式中 $f_0=4.856$ , $p=25$ , $s=0.007$ , $\omega=-0.006$ ,如图5中虚线所示。

[0074] 设置反应谱迭代调整轮数最大为20次, $\rho_{\text{CWT}^0, \text{CWT}}$ 最小为0.95。按照本研究提出的方法拟合的加速度时程与目标强度包线的对比如图4所示,其反应谱最大拟合误差如图3所示为5%,主频率拟合效果如图5所示。该地震动反应谱,峰值加速度,强度和频率非平稳特性均满足目标要求。

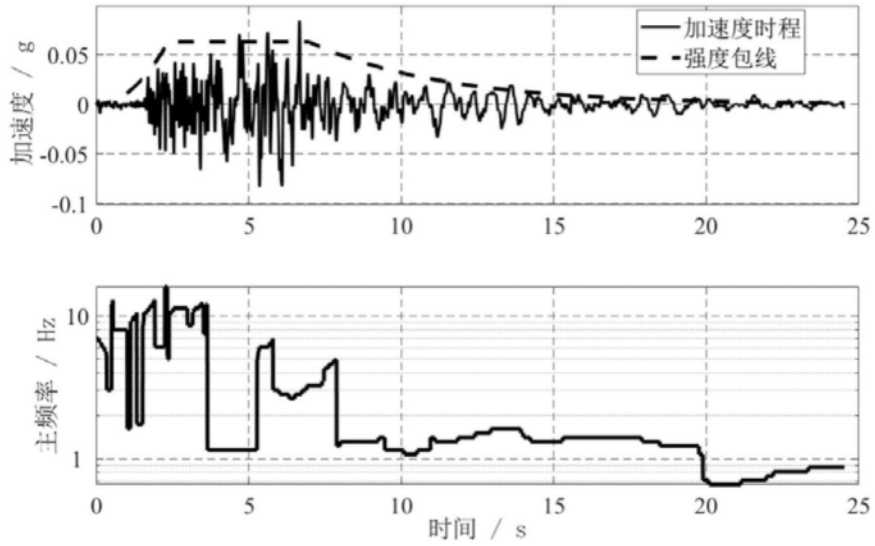


图1

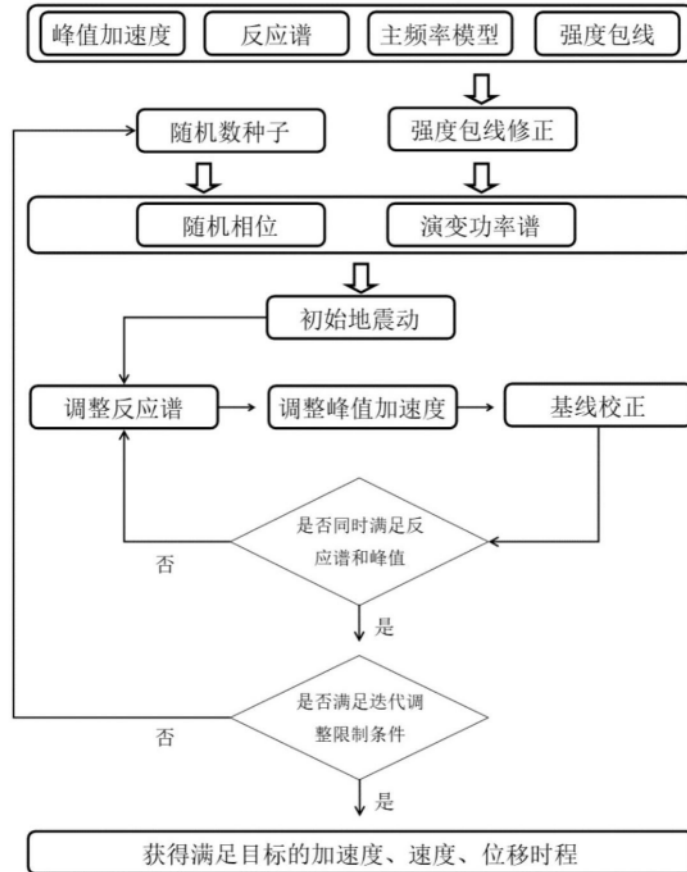


图2

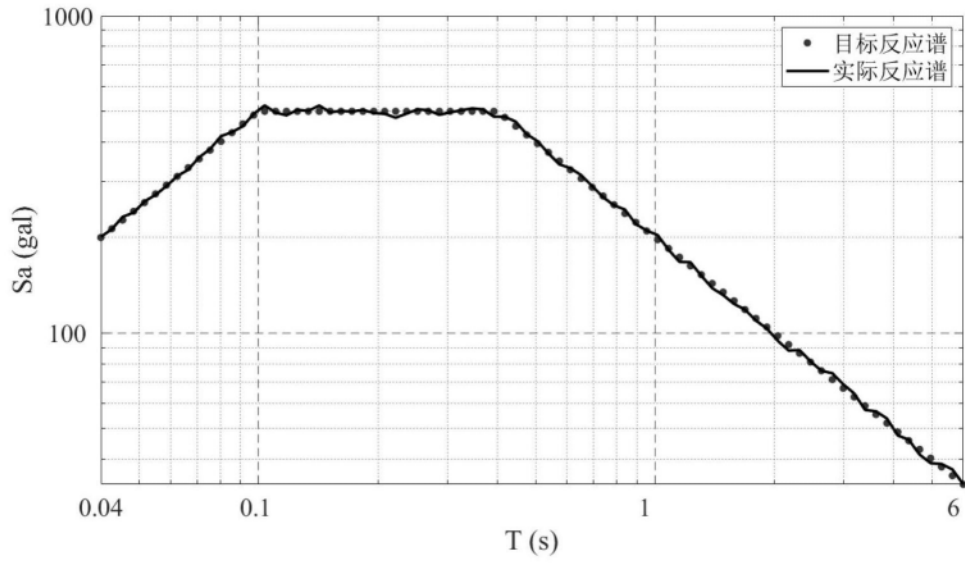


图3

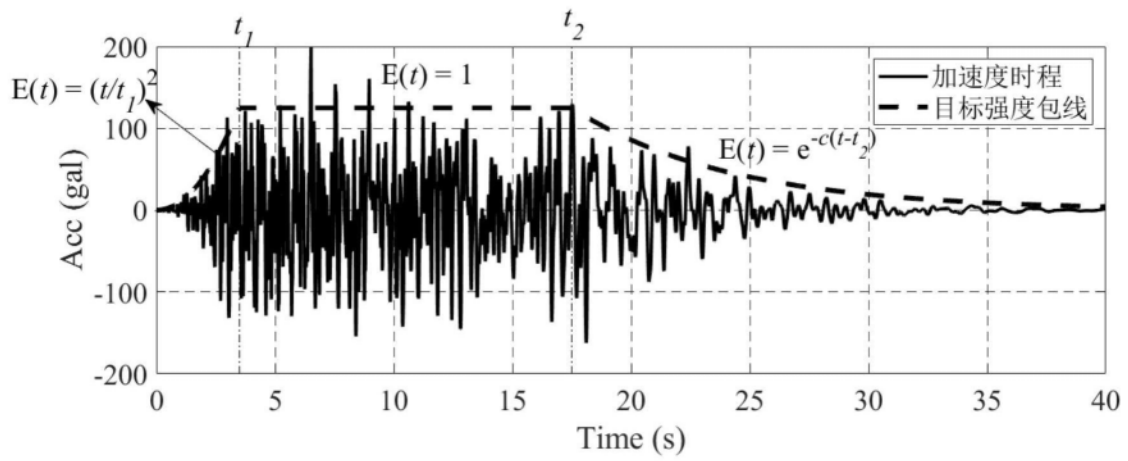


图4

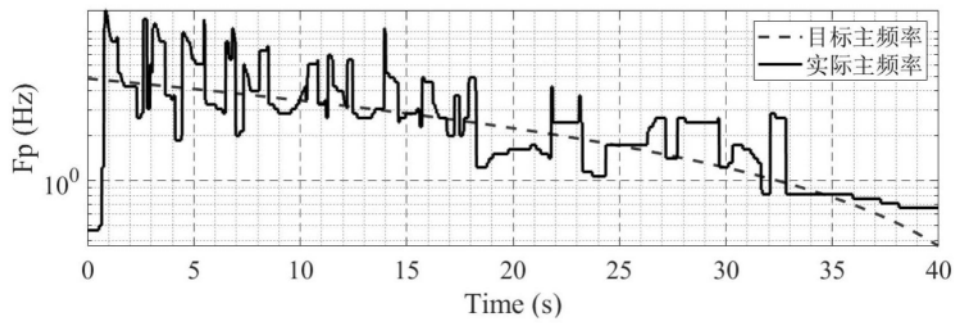


图5