



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110083920 B

(45) 授权公告日 2022. 11. 04

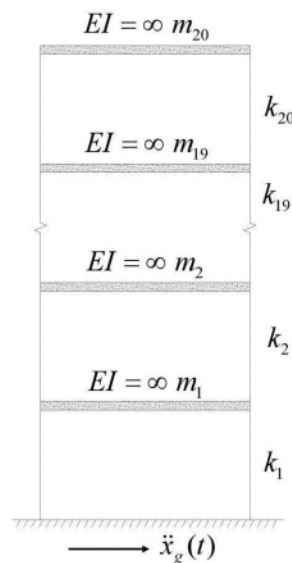
(21) 申请号 201910326203.2	CN 105143922 A, 2015.12.09
(22) 申请日 2019.04.23	CN 101848178 A, 2010.09.29
(65) 同一申请的已公布的文献号 申请公布号 CN 110083920 A	CN 109459129 A, 2019.03.12
(43) 申请公布日 2019.08.02	CN 106874586 A, 2017.06.20
(73) 专利权人 西南交通大学 地址 610031 四川省成都市二环路北一段 111号西南交通大学科技处	CN 107438398 A, 2017.12.05
(72) 发明人 赵宁 黄国庆 刘瑞莉	CN 108318129 A, 2018.07.24
(74) 专利代理机构 成都信博专利代理有限责任 公司 51200 专利代理师 卓仲阳 舒启龙	CN 101600144 A, 2009.12.09
(51) Int. Cl. G06F 30/20 (2020.01) G06F 17/16 (2006.01) G06F 119/14 (2020.01)	US 2010030478 A1, 2010.02.04
(56) 对比文件 CN 109459129 A, 2019.03.12	US 10042038 B1, 2018.08.07
	US 2010223276 A1, 2010.09.02
	J. Fan 等. "Time-Frequency Analysis of Earthquake Record Based on S Transform and Its Effect on Structural Seismic Response". 《2009 International Conference on Engineering Computation》. 2009,
	杨成 等. "基于经验模态分解的速度脉冲型地震动量化识别". 《工程力学》. 2017,
	审查员 李小敏
	权利要求书4页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

一种地震作用下非比例阻尼结构随机响应的分析方法

(57) 摘要

本发明公开了一种地震作用下非比例阻尼结构随机响应的分析方法,具体步骤为:1、获取结构关于任意激励的单位脉冲响应;2、基于随机振动理论,建立响应功率谱计算的直接卷积公式;3、将各点激励的非均匀调制函数作POD特征正交分解;4、使用FFT计算演化频响矩阵,进而确定结构响应的演化功率谱矩阵和方差矩阵;本发明将响应统计量显式地表示为关于脉冲响应的卷积形式,并利用了FFT技术计算卷积,大大提高了响应计算效率;这种方法既适用于线性结构,也适用于非线性结构,也可用于通过模态叠加法降阶后的线性系统。



CN 110083920 B

1. 一种地震作用下非比例阻尼结构随机响应的分析方法,其特征在于,具体步骤如下:

步骤1:获取结构关于任意激励的单位脉冲响应,具体为:

在n点地震激励 $X(t)$ 作用下,一个N自由度的结构体系的动力方程为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{Y}(t) = \mathbf{\Gamma}\mathbf{X}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Y}(t)$, $\dot{\mathbf{Y}}(t)$ 和 $\ddot{\mathbf{Y}}(t)$ 分别为结构的 $N \times 1$ 阶位移向量,速度向量和加速度向量; \mathbf{M} , \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 分别是 $N \times N$ 阶质量矩阵,非比例阻尼矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{\Gamma}$ 是 $N \times n$ 阶只包含元素0和1的荷载分布矩阵,它把n维荷载向量拓展到N维荷载向量;

基于因果系统单位脉冲响应函数求解的等效初始条件法,结构关于任意激励的单位脉冲响应被计算如下:

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{h}}_r(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{h}}_r(t) + \mathbf{K}\mathbf{h}_r(t) = \mathbf{0} \\ \mathbf{h}_r(0) = \mathbf{0}, \dot{\mathbf{h}}_r(0) = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{\Gamma}_r \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{h}_r(t)$, $\dot{\mathbf{h}}_r(t)$ 和 $\ddot{\mathbf{h}}_r(t)$ 分别是相应于第r个激励的单位脉冲位移、速度和加速度响应; $\mathbf{\Gamma}_r$ 是 $\mathbf{\Gamma}$ 的第r列向量,仅在第r个激励作用的自由度上的元素为1,其他元素为0,然后通过使用Newmark- β 法求解上式,这些单位脉冲响应从分析结构的有限元模型中计算得到;

此外,用一种脉冲激励法来识别结构的单位脉冲响应,考虑一个 $n \times 1$ 阶的脉冲激励向量 $\mathbf{X}^{(0)}(t_j) = \{0, \dots, 0, x_r^{(0)}(t_j), 0, \dots, 0\}^T$,其中T表示转置, t_j 表示第j个时刻, $x_r^{(0)}(t_j)$ 是离散时间脉冲,表示为:

$$x_r^{(0)}(t_j) = \begin{cases} 0, & 1 \leq j \leq N_t - 1 \\ 1, & j = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中时间步长为 Δt ,共有 N_t 个离散时间点,首先,使用Newmark- β 法计算出结构在这个脉冲激励 $X^{(0)}(t_j)$ 作用下的响应为 $\mathbf{Y}^{(0)}(t_j)$,然后,求得关于第r个激励的离散时间脉冲响应为:

$$\hat{\mathbf{h}}_r(t_j) = 2\mathbf{Y}^{(0)}(t_j), \quad j = 0, 1, \dots, N_t - 1 \quad (4)$$

式中离散时间脉冲响应 $\hat{\mathbf{h}}_r(t_j) = \mathbf{h}_r(t_j)\Delta t$, $\mathbf{h}_r(t_j)$ 为第r个激励的结构脉冲响应;在Newmark- β 法的计算中,结构的位移、速度和加速度三种响应 $\mathbf{Y}^{(0)}(t_j)$, $\dot{\mathbf{Y}}^{(0)}(t_j)$ 和 $\ddot{\mathbf{Y}}^{(0)}(t_j)$ 可以同时求得,因此,可进一步获得关于速度和加速度的离散时间脉冲响应矩阵;

此外,考虑另一个的脉冲激励向量 $\mathbf{X}^{(1)}(t_j) = \{0, \dots, 0, x_r^{(1)}(t_j), 0, \dots, 0\}^T$,其中 $x_r^{(1)}(t_j)$ 为

$$x_r^{(1)}(t_j) = \begin{cases} 0, & j = 0 \text{ and } 2 \leq j \leq N_t - 1 \\ 1, & j = 1 \end{cases} \quad (5)$$

同样可求得关于第r个激励的离散时间脉冲响应为:

$$\hat{\mathbf{h}}_r(t_j) = \mathbf{Y}^{(1)}(t_j + \Delta t), \quad j = 0, 1, \dots, N_t - 1 \quad (6)$$

式中 $\mathbf{Y}^{(1)}(t_j)$ 是结构对脉冲激励 $X^{(1)}(t_j)$ 的响应,同样使用Newmark- β 法来计算,因此,在任意时刻对结构施加脉冲激励,均能识别出结构的离散时间脉冲响应矩阵;

步骤2:基于随机振动理论,建立响应功率谱计算的直接卷积公式,具体为:

对于一个零均值 n 变量的非平稳随机激励过程 $X(t) = \{x_1(t), \dots, x_r(t), \dots, x_n(t)\}^T$, 根据演化谱理论, 它的互演化功率谱矩阵可以表示为:

$$\mathbf{S}_x(\omega, t) = \mathbf{A}(\omega, t) \bar{\mathbf{S}}_x(\omega) \mathbf{A}^*(\omega, t) \quad (7)$$

式中 $\mathbf{A}^*(\omega, t)$ 表示幅值调制函数的共轭矩阵, ω 为圆频率, 通过维纳-辛钦定理, 随机过程 $X(t_1)$ 和 $X(t_2)$ 的互相关函数矩阵可以表示为:

$$\mathbf{R}_x(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{A}(\omega, t_1) \bar{\mathbf{S}}_x(\omega) \mathbf{A}^{T*}(\omega, t_2) e^{-i\omega(t_1-t_2)} d\omega \quad (8)$$

式中 $\mathbf{A}(\omega, t)$ 是由非均匀调制函数 $A_r(\omega, t)$ 组成的 n 阶对角矩阵, $\mathbf{A}^{T*}(\omega, t_2)$ 表示幅值调制函数的共轭转置矩阵; $\bar{\mathbf{S}}_x(\omega)$ 是与非平稳随机过程相对应的 n 阶平稳功率谱矩阵;

那么, 基于随机振动理论, 在该非平稳随机激励作用下, 结构位移向量 Y 的演化功率谱矩阵为:

$$\mathbf{S}_y(\omega, t) = \mathbf{I}(\omega, t) \bar{\mathbf{S}}_x(\omega) \mathbf{I}^{T*}(\omega, t) \quad (9)$$

式中 $\mathbf{I}^{T*}(\omega, t)$ 为演化频率响应矩阵 $\mathbf{I}(\omega, t)$ 的共轭转置矩阵;

$$\mathbf{I}(\omega, t) = \int_0^t \mathbf{h}(t-\tau) \mathbf{A}(\omega, \tau) e^{i\omega\tau} d\tau \quad (10)$$

式中: $\mathbf{h}(t) = [h_r(t)]$; $\mathbf{A}(\omega, \tau)$ 表示任一时刻非均匀调制函数 $A_r(\omega, \tau)$ 组成的 n 阶对角矩阵;

进一步, (10)式被改写为相应矩阵元素的表达形式, 如下:

$$I_{kr}(\omega, t) = \int_0^t h_{kr}(t-\tau) A_r(\omega, \tau) e^{i\omega\tau} d\tau \quad k=1, 2, \dots, N; r=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

式中 $I_{kr}(\omega, t)$ 是演化频率响应矩阵 $\mathbf{I}(\omega, t)$ 的第 k 行 r 列的元素, $h_{kr}(t-\tau)$ 是杜哈梅积分项;

步骤3: 将各点激励的非均匀调制函数作POD特征正交分解;

步骤4: 使用FFT计算演化频响矩阵, 进而确定结构响应的演化功率谱矩阵和方差矩阵。

2. 根据权利要求1所述的一种地震作用下非比例阻尼结构随机响应的分析方法, 其特征在于, 所述步骤3具体为:

将各点激励的非均匀调制函数作特征正交分解后, 再近似表达为多个时间函数和频率函数乘积之和:

$$A_r(\omega, \tau) \approx \sum_{q=1}^{N_\phi^r} a_q^r(\tau) \varphi_q^r(\omega) \quad r=1, 2, \dots, n \quad (12)$$

式中 $\varphi_q^r(\omega)$ 是频率相关矩阵 \mathbf{R}_r 的第 q 个特征向量; $a_q^r(\tau)$ 是通过 $a_q^r(\tau) = [\varphi_q^r(\omega)]^T A_r(\omega, \tau)$ 计算的第 q 个主坐标; N_ϕ^r 是包含绝大部分能量的有效项数。

3. 根据权利要求2所述的一种地震作用下非比例阻尼结构随机响应的分析方法, 其特征在于, 所述步骤4具体为:

由于当 $\tau \geq t$ 时, $h_{kr}(t-\tau) = 0$; 当 $t < 0$ 时, $A_r(\omega, t) = 0$, 所以(11)式被改写为:

$$I_{kr}(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{kr}(t-\tau) A_r(\omega, \tau) e^{i\omega\tau} d\tau \quad (13)$$

将(12)式代入(13)式, 调制函数中的频率项从积分式中分离出来, (13)式可转换为FFT直接可用的形式:

$$I_{kr}(\omega, t) = \sum_{q=1}^{N_r} \varphi_q^r(\omega) \left[\int_{-\infty}^{\infty} a_q^r(\tau) h_{kr}(t-\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right]^* \quad (14)$$

对于每一个给定的时刻 t 采用FFT技术快速计算,然后,根据(9)式可求得位移响应的演化功率谱矩阵 $S_y(\omega, t)$,进而位移响应的时变方差可得:

$$\sigma_y^2(t) = 2 \int_0^{\infty} S_y(\omega, t) d\omega \quad (15)$$

4. 一种用于非线性结构的非平稳随机响应分析方法,其特征在于,基于等效线性化方法,将权利要求1所述非比例阻尼结构随机响应的分析方法扩展应用于非线性结构的非平稳随机响应高效分析,包括以下步骤:

步骤A:建立非线性系统在任意非平稳激励下的运动方程;

考虑一个具有 N 个自由度的滞迟系统,它受到非平稳随机激励 $X(t)$,其中单元激励数为 $n=N$,它的运动方程表示为:

$$\begin{aligned} m_i \ddot{y}_i + c_i \dot{z}_i - c_{i+1} \dot{z}_{i+1} + f_i(z_i, u_i) - f_{i+1}(z_{i+1}, u_{i+1}) &= x_i \quad i=1, 2, \dots, N-1 \\ m_N \ddot{y}_N + c_N \dot{z}_N + f_N(z_N, u_N) &= x_N \end{aligned} \quad (16)$$

式中, m_i, c_i, y_i 和 x_i 分别为第 i 层的质量、阻尼、位移和激励;层间相对位移 $z_i = y_i - y_{i-1}$, $i=1, 2, \dots, N$,其中 $y_0=0$;基于Bouc-Wen模型的恢复力可表示为:

$$f_i(z_i, u_i) = \gamma_i k_i z_i + (1 - \gamma_i) k_i u_i \quad i=1, 2, \dots, N \quad (17)$$

式中 k_i 是初始刚度; γ_i 是第 i 层的刚度折减系数;滞迟位移 u_i 与 z_i 有关,满足下列非线性微分方程:

$$\dot{u}_i = \phi_i \dot{z}_i - \varphi_i |\dot{z}_i| |u_i|^{q_i-1} - \beta_i \dot{z}_i |u_i|^{\theta_i} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (18)$$

式中 $\phi_i, \varphi_i, \beta_i$,和 θ_i 是第 i 层滞迟位移的参数;

步骤B:在特定时刻,将非线性系统转化为等效线性系统;

基于等效线性化准则,滞迟系统在任意时刻 α 的等效线性系统的运动方程为:

$$\begin{aligned} M\ddot{Y}(t) + C\dot{Y}(t) + KY(t) + K_h U(t) &= \Gamma X(t) \\ \dot{U}(t) &= Q(\alpha)\dot{Y}(t) + G(\alpha)U(t) \end{aligned} \quad 0 \leq t \leq \alpha \quad (19)$$

式中 $Y(t) = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$ 是位移向量; $U(t) = [u_1, u_2, \dots, u_N]^T$ 是滞迟位移向量; M, C, K 和 K_h 分别是质量矩阵、阻尼矩阵、弹性刚度矩阵和滞迟刚度矩阵,

$Q(\alpha)$ 和 $G(\alpha)$ 是等效系数矩阵,表示如下:

$$Q(\alpha) = \begin{bmatrix} q_1(\alpha) & & & 0 \\ -q_2(\alpha) & q_2(\alpha) & & \\ & \ddots & \ddots & \\ 0 & & -q_N(\alpha) & q_N(\alpha) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$G(\alpha) = \begin{bmatrix} g_1(\alpha) & & & 0 \\ & g_2(\alpha) & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & g_N(\alpha) \end{bmatrix} \quad (22)$$

当假定 $\theta_i=1$,等效系数 $q_i(\alpha)$ 和 $g_i(\alpha)$ 可由下式得到:

$$q_i(\alpha) = \phi_i - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\phi_i \frac{E[\dot{z}_i(\alpha)u_i(\alpha)]}{\sigma_{\dot{z}_i}(\alpha)} + \beta_i \sigma_{u_i}(\alpha) \right) \quad (23)$$

$$g_i(\alpha) = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\phi_i \sigma_{\dot{z}_i}(\alpha) + \beta_i \frac{E[\dot{z}_i(\alpha)u_i(\alpha)]}{\sigma_{u_i}(\alpha)} \right)$$

$$E[\dot{z}_i(\alpha)u_i(\alpha)] = E[\dot{y}_i(\alpha)u_i(\alpha)] - E[\dot{y}_{i-1}(\alpha)u_i(\alpha)]$$

$$\sigma_{\dot{z}_i}(\alpha) = \sqrt{E[\dot{y}_i^2(\alpha)] - 2E[\dot{y}_i(\alpha)\dot{y}_{i-1}(\alpha)] + E[\dot{y}_{i-1}^2(\alpha)]} \quad (24)$$

$$\sigma_{u_i}(\alpha) = \sqrt{E[u_i^2(\alpha)]}$$

式中 $\sigma_{\dot{z}_i}(\alpha)$ 和 $\sigma_{u_i}(\alpha)$ 分别是 $\dot{z}_i(\alpha)$ 和 $u_i(\alpha)$ 的标准差；

步骤C: 迭代求解每一个等效线性系统在特定时刻的非平稳响应, 步骤如下:

步骤(1) 在给定的时刻 α , 给 $E[\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)^T]$, $E[\mathbf{U}(\alpha)\mathbf{U}(\alpha)^T]$ 和 $E[\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)\mathbf{U}(\alpha)^T]$ 赋初值, 通常取前一个时刻的收敛结果; 然后, 计算初始等效系数矩阵 $\mathbf{Q}(\alpha)$ 和 $\mathbf{G}(\alpha)$, 代入 (19) 式得到 α 时刻的初始等效线性系统;

步骤(2) 对于每个元素激励 x_i , 构造单位脉冲激励, 并将其施加到 (19) 式表示的等效线性系统; 通过 Newmark- β 法求得速度和滞迟位移的离散时间脉冲响应矩阵 $\hat{\mathbf{h}}_y(t)$ 和 $\hat{\mathbf{h}}_u(t)$;

步骤(3) 使用 FFT 计算关于脉冲响应矩阵 $\hat{\mathbf{h}}_y(t)$ 和 $\hat{\mathbf{h}}_u(t)$ 的卷积, 求得 $\mathbf{I}_y(\omega, \alpha)$ 和 $\mathbf{I}_u(\omega, \alpha)$;

步骤(4) 计算新的响应统计量 $E[\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)^T]$, $E[\mathbf{U}(\alpha)\mathbf{U}(\alpha)^T]$ 和 $E[\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)\mathbf{U}(\alpha)^T]$;

步骤(5) 将新的响应统计量代入 (21) 式 ~ (24) 式得到新的等效系数矩阵 $\mathbf{Q}(\alpha)$ 和 $\mathbf{G}(\alpha)$, 并更新 (19) 式表示的等效线性系统;

步骤(6) 重复步骤(2) ~ 步骤(5) 步直到响应统计量 $E[\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)^T]$, $E[\mathbf{U}(\alpha)\mathbf{U}(\alpha)^T]$ 和 $E[\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)\mathbf{U}(\alpha)^T]$ 收敛, 即得到 α 时刻的真实等效线性系统;

步骤(7) 求解真实等效线性系统的位移离散时间脉冲响应矩阵 $\hat{\mathbf{h}}_y(t)$, 进而计算出位移响应统计量 $E[\mathbf{Y}(\alpha)\mathbf{Y}(\alpha)^T]$;

步骤(8) 移动到下一个时刻, 并且重复步骤(1) ~ 步骤(7) 直到所有关心时刻的响应统计量全部被确定。

一种地震作用下非比例阻尼结构随机响应的分析方法

技术领域

[0001] 本发明属于随机振动分析领域,具体涉及一种地震作用下非比例阻尼结构随机响应的分析方法。

背景技术

[0002] 非比例阻尼特性对结构动力响应有相当大的影响,在一些情况下,结构阻尼不能假定为比例阻尼,比如底部混凝土结构-上部钢结构的混合结构体系、设置有阻尼器的结构以及隔震结构等。此外,在基于等效线性化的非线性随机振动分析中,由于引入了额外的等效矩阵,等效线性系统也是非比例阻尼系统。

[0003] 工程结构常常受到地震等非平稳激励的作用,这类问题的分析通常借助于非平稳随机振动理论。非比例阻尼结构的非平稳随机响应分析一般需要借助复模态分析,然而,对于大型多自由度结构的复模态分析的计算是相对复杂的,而且模态叠加法对于位移响应有较好的近似,但对于内力和应力误差较大。为了得到较精确的结果往往需要计算大量的振型,这使得计算效率下降。因此,目前这类结构的非平稳响应分析以直接积分的方法为主。其中,林家浩提出的虚拟激励法,将非平稳随机振动问题转化为结构的确定性瞬时动力时程分析,求解过程变得相当直观,因而得到了广泛的应用。但是随着结构趋于大型复杂化,使用Newmark- β 法直接积分的计算已经不能满足效率的要求,所以林家浩等又将钟万勰提出的精细积分法与虚拟激励法相结合求解非平稳随机振动问题,使计算效率得到较大的提升。尽管这种方法提高了单次时程分析的计算效率,但时程分析的总次数却没有减少。对于频率密集分布的大跨柔性结构而言,可能需要成千上万次时程分析,此时上述方法仍然面临挑战。

发明内容

[0004] 为了提高非比例阻尼结构的非平稳响应分析的效率,本发明提供了一种地震作用下非比例阻尼结构随机响应的分析方法,具体步骤如下:

[0005] 步骤1:获取结构关于任意激励的单位脉冲响应。

[0006] 在n点地震激励 $X(t)$ 作用下,一个N自由度的结构体系的动力方程为:

$$[0007] \quad \mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{Y}(t) = \mathbf{\Gamma}\mathbf{X}(t) \quad (1)$$

[0008] 式中: $\mathbf{Y}(t)$, $\dot{\mathbf{Y}}(t)$ 和 $\ddot{\mathbf{Y}}(t)$ 分别为结构的 $N \times 1$ 阶位移向量,速度向量和加速度向量; \mathbf{M} , \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 分别是 $N \times N$ 阶质量矩阵,非比例阻尼矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{\Gamma}$ 是 $N \times n$ 阶只包含元素0和1的荷载分布矩阵,它把n维荷载向量拓展到N维荷载向量;

[0009] 基于因果系统单位脉冲响应函数求解的等效初始条件法,结构关于任意激励的单位脉冲响应被计算如下:

$$[0010] \quad \begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{h}}_r(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{h}}_r(t) + \mathbf{K}\mathbf{h}_r(t) = \mathbf{0} \\ \mathbf{h}_r(0) = \mathbf{0}, \dot{\mathbf{h}}_r(0) = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{\Gamma}_r \end{cases} \quad (2)$$

[0011] 式中： $h_r(t)$ 、 $\dot{h}_r(t)$ 和 $\ddot{h}_r(t)$ 分别是相应于第r个激励的单位脉冲位移、速度和加速度响应； Γ_r 是 Γ 的第r列向量，仅在第r个激励作用的自由度上的元素为1，其他元素为0，然后通过使用Newmark- β 法求解上式，这些单位脉冲响应从分析结构的有限元模型中计算得到；

[0012] 此外，用一种脉冲激励法来识别结构的单位脉冲响应，考虑一个 $n \times 1$ 阶的脉冲激励向量 $\mathbf{X}^{(0)}(t_j) = \{0, \dots, 0, x_r^{(0)}(t_j), 0, \dots, 0\}^T$ ，其中T表示转置， t_j 表示第j个时刻， $x_r^{(0)}(t_j)$ 是离散时间脉冲，表示为：

$$[0013] \quad x_r^{(0)}(t_j) = \begin{cases} 0, & 1 \leq j \leq N_t - 1 \\ 1, & j = 0 \end{cases} \quad (3)$$

[0014] 式中时间步长为 Δt ，共有 N_t 个离散时间点，首先，使用Newmark- β 法计算出结构在这个脉冲激励 $X^{(0)}(t_j)$ 作用下的响应为 $Y^{(0)}(t_j)$ ，然后，求得关于第r个激励的离散时间脉冲响应为：

$$[0015] \quad \hat{h}_r(t_j) = 2Y^{(0)}(t_j), \quad j = 0, 1, \dots, N_t - 1 \quad (4)$$

[0016] 式中离散时间脉冲响应 $\hat{h}_r(t_j) = h_r(t_j)\Delta t$ ， $h_r(t_j)$ 为第r个激励的结构脉冲响应；在Newmark- β 法的计算中，结构的位移、速度和加速度三种响应 $Y^{(0)}(t_j)$ ， $\dot{Y}^{(0)}(t_j)$ 和 $\ddot{Y}^{(0)}(t_j)$ 可以同时求得，因此，类似于(4)式的计算，可进一步获得关于速度和加速度的离散时间脉冲响应矩阵；

[0017] 此外，考虑另一个的脉冲激励向量 $\mathbf{X}^{(1)}(t_j) = \{0, \dots, 0, x_r^{(1)}(t_j), 0, \dots, 0\}^T$ ，其中 $x_r^{(1)}(t_j)$ 为

$$[0018] \quad x_r^{(1)}(t_j) = \begin{cases} 0, & j = 0 \text{ and } 2 \leq j \leq N_t - 1 \\ 1, & j = 1 \end{cases} \quad (5)$$

[0019] 同样可求得关于第r个激励的离散时间脉冲响应为：

$$[0020] \quad \hat{h}_r(t_j) = Y^{(1)}(t_j + \Delta t), \quad j = 0, 1, \dots, N_t - 1 \quad (6)$$

[0021] 式中 $Y^{(1)}(t_j)$ 是结构对脉冲激励 $X^{(1)}(t_j)$ 的响应，同样使用Newmark- β 法来计算，因此，在任意时刻对结构施加脉冲激励，均能识别出结构的离散时间脉冲响应矩阵。

[0022] 步骤2：基于随机振动理论，建立响应功率谱计算的直接卷积公式。

[0023] 对于一个零均值n变量的非平稳随机激励过程 $X(t) = \{x_1(t), \dots, x_r(t), \dots, x_n(t)\}^T$ ，根据Priestley提出的演化谱理论，它的互演化功率谱矩阵可以表示为：

$$[0024] \quad \mathbf{S}_x(\omega, t) = \mathbf{A}(\omega, t)\bar{\mathbf{S}}_x(\omega)\mathbf{A}^*(\omega, t) \quad (7)$$

[0025] 式中 $\mathbf{A}^*(\omega, t)$ 表示幅值调制函数的共轭矩阵， ω 为圆频率，通过维纳-辛钦定理，随机过程 $X(t_1)$ 和 $X(t_2)$ 的互相关函数矩阵可以表示为：

$$[0026] \quad \mathbf{R}_x(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{A}(\omega, t_1)\bar{\mathbf{S}}_x(\omega)\mathbf{A}^{T*}(\omega, t_2)e^{-i\omega(t_1-t_2)}d\omega \quad (8)$$

[0027] 式中 $\mathbf{A}(\omega, t)$ 是由非均匀调制函数 $A_r(\omega, t)$ 组成的n阶对角矩阵， $\mathbf{A}^{T*}(\omega, t_2)$ 表示

幅值调制函数的共轭转置矩阵; $\bar{\mathbf{S}}_x(\omega)$ 是与非平稳随机过程相对应的n阶平稳功率谱矩阵; i 虚数的单位, $d\omega$ 表示微分, e 表示自然指数。

[0028] 那么, 基于随机振动理论, 在该非平稳随机激励作用下, 结构位移向量 Y 的演化功率谱矩阵为:

$$[0029] \quad \mathbf{S}_y(\omega, t) = \mathbf{I}(\omega, t) \bar{\mathbf{S}}_x(\omega) \mathbf{I}^{T*}(\omega, t) \quad (9)$$

[0030] 式中 $\mathbf{I}^{T*}(\omega, t)$ 为演化频率响应矩阵 $\mathbf{I}(\omega, t)$ 的共轭转置矩阵;

$$[0031] \quad \mathbf{I}(\omega, t) = \int_0^t \mathbf{h}(t-\tau) \mathbf{A}(\omega, \tau) e^{i\omega\tau} d\tau \quad (10)$$

[0032] 式中: $\mathbf{h}(t) = [h_r(t)]$; $\mathbf{A}(\omega, \tau)$ 表示任一时刻非均匀调制函数 $A_r(\omega, \tau)$ 组成的n阶对角矩阵;

[0033] 进一步, (10) 式被改写为相应矩阵元素的表达形式, 如下:

$$[0034] \quad I_{kr}(\omega, t) = \int_0^t h_{kr}(t-\tau) A_r(\omega, \tau) e^{i\omega\tau} d\tau \quad k=1, 2, \dots, N; r=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

[0035] 式中 $I_{kr}(\omega, t)$ 是演化频率响应矩阵 $\mathbf{I}(\omega, t)$ 的第k行r列的元素, $h_{kr}(t-\tau)$ 是杜哈梅积分项。

[0036] 步骤3: 将各点激励的非均匀调制函数作POD特征正交分解。

[0037] 将各点激励的非均匀调制函数作特征正交分解后, 再近似表达为多个时间函数和频率函数乘积之和:

$$[0038] \quad A_r(\omega, \tau) \approx \sum_{q=1}^{N_\varphi^r} a_q^r(\tau) \varphi_q^r(\omega) \quad r=1, 2, \dots, n \quad (12)$$

[0039] 式中 $\varphi_q^r(\omega)$ 是频率相关矩阵 R_r 的第q个特征向量, φ 为分解的频率函数; $a_q^r(\tau)$ 是通过 $a_q^r(\tau) = [\varphi_q^r(\omega)]^T A_r(\omega, \tau)$ 计算的第q个主坐标; N_φ^r 是包含绝大部分能量的有效项数。

[0040] 步骤4: 使用FFT计算演化频响矩阵, 进而确定结构响应的演化功率谱矩阵和方差矩阵。

[0041] 由于当 $\tau \geq t$ 时, $h_{kr}(t-\tau) = 0$; 当 $t < 0$ 时, $A_r(\omega, t) = 0$, 所以 (11) 式被改写为:

$$[0042] \quad I_{kr}(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{kr}(t-\tau) A_r(\omega, \tau) e^{i\omega\tau} d\tau \quad (13)$$

[0043] 将 (12) 式代入 (13) 式, 调制函数中的频率项从积分式中分离出来, (13) 式可转换为FFT直接可用的形式:

$$[0044] \quad I_{kr}(\omega, t) = \sum_{q=1}^{N_\varphi^r} \varphi_q^r(\omega) \left[\int_{-\infty}^{\infty} a_q^r(\tau) h_{kr}(t-\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right]^* \quad (14)$$

[0045] 对于每一个给定的时刻 t 采用FFT技术快速计算, 然后, 根据 (9) 式可求得位移响应的演化功率谱矩阵 $\mathbf{S}_y(\omega, t)$, 进而位移响应的时变方差可得:

$$[0046] \quad \sigma_y^2(t) = 2 \int_0^{\infty} \mathbf{S}_y(\omega, t) d\omega \quad (15)$$

[0047] 进一步, 基于等效线性化方法, 将上述算法扩展应用于非线性结构的非平稳随机响应高效分析, 包括以下步骤:

[0048] 步骤A:建立非线性系统在任意非平稳激励下的运动方程;

[0049] 考虑一个具有N个自由度的滞迟系统,它受到非平稳随机激励 $X(t)$,其中单元激励数为 $n=N$,它的运动方程表示为:

$$\begin{aligned} [0050] \quad & m_i \ddot{y}_i + c_i \dot{z}_i - c_{i+1} \dot{z}_{i+1} + f_i(z_i, u_i) - f_{i+1}(z_{i+1}, u_{i+1}) = x_i \quad (i = 1, 2, \dots, N-1) \\ & m_N \ddot{y}_N + c_N \dot{z}_N + f_N(z_N, u_N) = x_N \end{aligned} \quad (16)$$

[0051] 式中 m_i, c_i, y_i 和 x_i 分别为第i层的质量、阻尼、位移和激励;层间相对位移 $z_i = y_i - y_{i-1}$ ($i = 1, 2, \dots, N$),其中 $y_0 = 0$;基于Bouc-Wen模型的恢复力可表示为:

$$[0052] \quad f_i(z_i, u_i) = \gamma_i k_i z_i + (1 - \gamma_i) k_i u_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (17)$$

[0053] 式中 k_i 是初始刚度; γ_i 是第i层的刚度折减系数;滞迟位移 u_i 与 z_i 有关,满足下列非线性微分方程:

$$[0054] \quad \dot{u}_i = \phi_i \dot{z}_i - \phi_i |\dot{z}_i| |u_i|^{q_i-1} - \beta_i \dot{z}_i |u_i|^{\theta_i} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (18)$$

[0055] 式中 $\phi_i, \varphi_i, \beta_i$,和 θ_i 是第i层滞迟位移的参数;

[0056] 步骤B:在特定时刻,将非线性系统转化为等效线性系统;

[0057] 基于等效线性化准则,滞迟系统在任意时刻 α 的等效线性系统的运动方程为:

$$\begin{aligned} [0058] \quad & \mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{Y}(t) + \mathbf{K}_h \mathbf{U}(t) = \mathbf{\Gamma}\mathbf{X}(t) \\ & \dot{\mathbf{U}}(t) = \mathbf{Q}(\alpha)\dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{G}(\alpha)\mathbf{U}(t) \end{aligned} \quad (0 \leq t \leq \alpha) \quad (19)$$

[0059] 式中 $\mathbf{Y}(t) = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$ 是位移向量; $\mathbf{U}(t) = [u_1, u_2, \dots, u_N]^T$ 是滞迟位移向量; $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ 和 \mathbf{K}_h 分别是质量矩阵、阻尼矩阵、弹性刚度矩阵和滞迟刚度矩阵,表示为:

$$[0060] \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & & & & 0 \\ & m_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & m_{N-1} & \\ 0 & & & & m_N \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & 0 \\ & c_2 + c_3 & \ddots & & \\ & & \ddots & & -c_{N-1} \\ & & & \text{Sym} & c_{N-1} + c_N \\ & & & & c_N \end{bmatrix}$$

$$[0061] \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \gamma_1 k_1 + \gamma_2 k_2 & -\gamma_2 k_2 & & & 0 \\ & \gamma_2 k_2 + \gamma_3 k_3 & \ddots & & \\ & & \ddots & & -\gamma_{N-1} k_{N-1} \\ & & & \text{Sym} & \gamma_{N-1} k_{N-1} + \gamma_N k_N \\ & & & & -\gamma_N k_N \\ & & & & \gamma_N k_N \end{bmatrix}$$

$$[0062] \quad \mathbf{K}_h = \begin{bmatrix} (1-\gamma_1)k_1 & -(1-\gamma_2)k_2 & & & 0 \\ & (1-\gamma_2)k_2 & \ddots & & \\ & & \ddots & & -(1-\gamma_{N-1})k_{N-1} \\ & & & (1-\gamma_{N-1})k_{N-1} & -(1-\gamma_N)k_N \\ 0 & & & & (1-\gamma_N)k_N \end{bmatrix} \quad (20)$$

[0063] $\mathbf{Q}(\alpha)$ 和 $\mathbf{G}(\alpha)$ 是等效系数矩阵,表示如下:

$$[0064] \quad \mathbf{Q}(\alpha) = \begin{bmatrix} q_1(\alpha) & & & & 0 \\ -q_2(\alpha) & q_2(\alpha) & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ 0 & & & -q_N(\alpha) & q_N(\alpha) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$[0065] \quad \mathbf{G}(\alpha) = \begin{bmatrix} g_1(\alpha) & & & & 0 \\ & g_2(\alpha) & & & \\ & & \ddots & & \\ 0 & & & & g_N(\alpha) \end{bmatrix} \quad (22)$$

[0066] 当假定 $\theta_i = 1$, 等效系数 $q_i(\alpha)$ 和 $g_i(\alpha)$ 可由下式得到:

$$[0067] \quad q_i(\alpha) = \phi_i - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\phi_i \frac{E[\dot{z}_i(\alpha)u_i(\alpha)]}{\sigma_{z_i}(\alpha)} + \beta_i \sigma_{u_i}(\alpha) \right) \quad (23)$$

$$g_i(\alpha) = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\phi_i \sigma_{z_i}(\alpha) + \beta_i \frac{E[\dot{z}_i(\alpha)u_i(\alpha)]}{\sigma_{u_i}(\alpha)} \right)$$

$$[0068] \quad E[\dot{z}_i(\alpha)u_i(\alpha)] = E[\dot{y}_i(\alpha)u_i(\alpha)] - E[\dot{y}_{i-1}(\alpha)u_i(\alpha)]$$

$$\sigma_{z_i}(\alpha) = \sqrt{E[\dot{y}_i^2(\alpha)] - 2E[\dot{y}_i(\alpha)\dot{y}_{i-1}(\alpha)] + E[\dot{y}_{i-1}^2(\alpha)]} \quad (24)$$

$$\sigma_{u_i}(\alpha) = \sqrt{E[u_i^2(\alpha)]}$$

[0069] 式中 $\sigma_{z_i}(\alpha)$ 和 $\sigma_{u_i}(\alpha)$ 分别是 $\dot{z}_i(\alpha)$ 和 $u_i(\alpha)$ 的标准差;

[0070] 步骤C:迭代求解每一个等效线性系统在特定时刻的非平稳响应,步骤如下;

[0071] 步骤(1)在给定的时刻 α ,给 $E[\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)^T]$, $E[\mathbf{U}(\alpha)\mathbf{U}(\alpha)^T]$ 和 $E[\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)\mathbf{U}(\alpha)^T]$ 赋初值,通常取前一个时刻的收敛结果;然后,计算初始等效系数矩阵 $\mathbf{Q}(\alpha)$ 和 $\mathbf{G}(\alpha)$,代入(19)式得到 α 时刻的初始等效线性系统;

[0072] 步骤(2)对于每个元素激励 x_i ,构造单位脉冲激励,并将其施加到(19)式表示的等效线性系统;通过Newmark- β 法求得速度和滞迟位移的离散时间脉冲响应矩阵 $\hat{\mathbf{h}}_y(t)$ 和 $\hat{\mathbf{h}}_u(t)$;

[0073] 步骤(3)使用FFT计算关于脉冲响应矩阵 $\hat{\mathbf{h}}_y(t)$ 和 $\hat{\mathbf{h}}_u(t)$ 的卷积,求得 $\mathbf{I}_y(\omega, \alpha)$ 和 $\mathbf{I}_u(\omega, \alpha)$;

[0074] 步骤(4)计算新的响应统计量 $E[\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)^T]$, $E[\mathbf{U}(\alpha)\mathbf{U}(\alpha)^T]$ 和 $E[\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)\mathbf{U}(\alpha)^T]$;

[0075] 步骤(5)将新的响应统计量代入(21)式~(24)式得到新的等效系数矩阵 $\mathbf{Q}(\alpha)$ 和 $\mathbf{G}(\alpha)$,并更新(19)式表示的等效线性系统;

[0076] 步骤(6)重复步骤(2)~步骤(5)步直到响应统计量 $E[\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)^T]$, $E[\mathbf{U}(\alpha)\mathbf{U}(\alpha)^T]$ 和 $E[\dot{\mathbf{Y}}(\alpha)\mathbf{U}(\alpha)^T]$ 收敛,即得到 α 时刻的真实等效线性系统;

[0077] 步骤(7)求解真实等效线性系统的位移离散时间脉冲响应矩阵 $\hat{\mathbf{h}}_y(t)$,进而计算出

位移响应统计量 $E[Y(\alpha)Y(\alpha)^T]$;

[0078] 步骤(8)移动到下一个时刻,并且重复步骤(1)~步骤(7)直到所有关心时刻的响应统计量全部被确定。

[0079] 本发明的有益效果为:本发明提出的地震作用下非比例阻尼结构随机响应分析的高效算法,将响应统计量显式地表示为关于脉冲响应的卷积形式,并利用了FFT技术计算卷积,大大提高了响应计算效率。这种方法既适用于线性结构,也适用于非线性结构,也可用于通过模态叠加法降阶后的线性系统。它可以只计算关注的自由度和时刻上的响应。当它用于非线性系统在任意地震激励下响应求解的等效线性化方法时,每次迭代只需要计算一个特定时刻和非线性自由度上的响应,从而避免传统方法在迭代求解过程中的大量冗余计算。因此,本发明可以作为大型非比例阻尼结构的非平稳响应分析的一种有效方法。

附图说明

[0080] 图1为一种地震激励下的高层建筑简化模型。

[0081] 图2为该线性结构第10和第20层的位移时变均方根。

[0082] 图3为非平稳响应分析耗时与结构自由度之间的关系。

[0083] 图4为N个自由度的滞迟系统。

[0084] 图5为滞迟系统的位移时变均方根完全非线性。

[0085] 图6为滞迟系统的位移时变均方根局部非线性。

具体实施方式

[0086] 下面将结合附图和具体实施例,对本发明的技术方案进行清楚、完整地描述。所述的方法可运用于非比例阻尼结构的非平稳随机响应分析,非比例阻尼结构包括底部混凝土结构-上部钢结构的混合结构体系、设置有阻尼器的结构以及隔震结构等。

[0087] 实例1:线性结构,用于受地震激励的高层建筑响应分析。

[0088] 考虑一个地震作用下的20层非比例阻尼建筑结构,其简化模型如图1所示。结构参数为 $m_i = 10000\text{kg}$ 和 $k_i = 16000\text{kN/m}$ ($1 \leq i \leq 20$)。它的运动方程给出如下:

$$[0089] \quad \mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{Y}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{E}\ddot{x}_g(t) \quad (25)$$

[0090] 式中: $\mathbf{M} = \text{diag}[m_i]$; $\mathbf{K} = \text{diag}[k_i]$; $\ddot{x}_g(t)$ 是地震加速度过程; \mathbf{E} 是单位向量。假定结构的阻尼矩阵是 $\mathbf{C} = \mathbf{C}_s + \mathbf{C}_r$, 其中 $\mathbf{C}_s = 0.3\mathbf{M} + 0.002\mathbf{K}$, $\mathbf{C}_r(1,1) = 20 \times \mathbf{C}_s(1,1)$, \mathbf{C}_r 的其他元素都为0。

[0091] 假定地震加速度过程 $\ddot{x}_g(t)$ 是一个非平稳随机过程,它的EPSD给出如下

$$[0092] \quad S_{\ddot{x}_g}(f, t) = 2\pi S_0 \left(\frac{f}{c}\right)^2 e^{-dt^2} e^{-\left(\frac{f}{c}\right)^2 t} \quad (26)$$

[0093] 式中: f 是赫兹频率; $S_0 = 1/690\text{m}^2\text{s}^{-3}$; $c = 2$; $d = 0.2$ 。为了评价快速卷积法的精度和效率,分别使用快速卷积法和传统的频域法计算结构在这个完全非平稳地震激励作用下的响应。计算中取激励EPSD的截止频率为 $f_u = 8\text{Hz}$; 频率增量为 $\Delta f = 1/64\text{Hz}$; 总时长为 32s ; 时间步长为 $\Delta t = 1/64\text{s}$ 。在快速卷积法中使用POD分解EPSD的近似项数取为10。

[0094] 本发明提出的方法被用于获得地震作用下建筑结构位移的均方根。结构第10和第20层的时变均方根如图2所示。由于响应随时间的演化特性,快速卷积法只计算了0.5s时间间隔的时刻处的响应,这足以反映响应的统计特性。从图2可以看到,快速卷积法与传统频域法得到的数值结果吻合较好,表明快速卷积法对线性结构的非平稳响应分析具有较好的精度。

[0095] 为了全面地比较快速卷积法与传统频域法的计算效率,进一步计算了50、100、150、200、250和300层的高层建筑在上述地震激励下的非平稳响应。这些结构中,除了自由度数目不同之外,其他计算参数保持不变。对于每个结构均计算出所有自由度上的响应。图3给出了计算耗时与自由度之间的关系曲线,显然,在非平稳响应分析中,快速卷积法的计算效率远远高于传统频域法。而且,随着自由度数的增加,效率的提高变得更明显。对于300个自由度,快速卷积法和传统频域法所消耗的时间分别为11.7s和276s,前者仅占后者的4.24%。此外,快速卷积法还可以只计算感兴趣的响应。假设只需要结构顶层的响应,相应的计算耗时也被绘制在图3中。可以看到,快速卷积法的效率被进一步提高。对于300个自由度,快速卷积法消耗的时间是0.32s,仅为传统频域法的0.12%。为了比较,我们定义了一种备选方法,将快速卷积法中识别脉冲响应矩阵的脉冲激励法替换为频率响应矩阵法。它在上述计算中的耗时也被比较,如图3所示。显然,快速卷积法比备选方法更高效,这说明脉冲激励法比频率响应矩阵法更高效。

[0096] 实例2:非线性结构,用于受地震作用的滞迟系统响应分析。

[0097] 考虑一个如图4所示的100个自由度的滞迟系统。系统各层的集中质量和层间初始线性刚度分别为 $m_i = 3000\text{kg}$ 和 $k_i = 8 \times 10^7\text{N/m}$ ($1 \leq i \leq 50$)、 $m_i = 2500\text{kg}$ 和 $k_i = 7.5 \times 10^7\text{N/m}$ ($51 \leq i \leq 100$)。各层的刚度折减系数为 $\gamma_i = 0.6$ ($1 \leq i \leq 100$)。各层的滞迟位移的参数为 $\phi_i = 1$, $\varphi_i = 400\text{m}^{-1}$, $\beta_i = 300\text{m}^{-1}$ 和 $\theta_i = 1$ ($1 \leq i \leq 100$)。阻尼矩阵C由瑞利阻尼模型定义,其比例系数由初始线性系统的第1阶模态和第100阶模态的阻尼比为0.05确定。该系统受到非平稳的地面加速度激励 $\ddot{x}_g(t)$,其EPSD由式定义,其中 $S_0 = 0.02\text{m}^2\text{s}^{-3}$ 。响应计算中选取截止频率为8Hz,频率增量为 $\Delta f = 1/32\text{Hz}$ 。对EPSD作POD时,近似项数 N_ϕ^r 取为10。

[0098] 通过基于快速卷积法的等效线性化方法和基于传统频域法的等效线性化方法,计算了这个滞迟系统的非平稳响应。为了验证等效线性化方法的准确性,还使用了4000个样本的Monte Carlo模拟(MCS)的计算结果作为对比。三种方法的计算总时长取为32s,时间步长为 $\Delta t = 1/32\text{s}$ 。图5展示了三种方法求得的滞迟系统的第50层和第100层的时变位移均方根。明显地,三种结果非常一致,表明基于快速卷积法的等效线性化方法对非线性结构的非平稳响应分析是有效的,并且具有较好的精度。表1比较了两个等效线性化方法的总计算时间。可以看到,基于传统频域法的等效线性化方法消耗的时间比基于快速卷积法的等效线性化方法长154倍。因此,对于非线性结构的等效线性化求解,快速卷积法具有比传统频域法高得多的计算效率。

[0099] 进一步,将三种方法用于局部非线性系统。考虑一个仅在第1层至第10层中具有非线性的滞迟系统,该系统的参数取为 $\phi_i = \varphi_i = \beta_i = 0$ 和 $\gamma_i = 1$ ($11 \leq i \leq 100$),其它参数与前面的滞迟系统相同。在同样的非平稳地震激励作用下,该滞迟系统的第50层和第100层的时

变位移均方根如图6所示,可见三种方法的计算结果吻合较好。表1也比较了两种等效线性化方法的计算效率。可以看到,基于快速卷积法的等效线性化方法对局部非线性问题具有更加明显的效率优势。

[0100] 表1两种等效线性化方法的总计算时间比较

方法	非线性系统	
	完全非线性	局部非线性
基于快速卷积法的等效线性化方法	14.8	3.7
基于传统频域法的等效线性化方法	2276	1999
总时间比	1:154	1:540

[0102] 上面结合附图对本发明的具体实施方式作了详细说明,但是本发明并不限于上述实施方式,在本领域普通技术人员所具备的知识范围内,还可以在不脱离本发明宗旨的前提下做出各种变化。

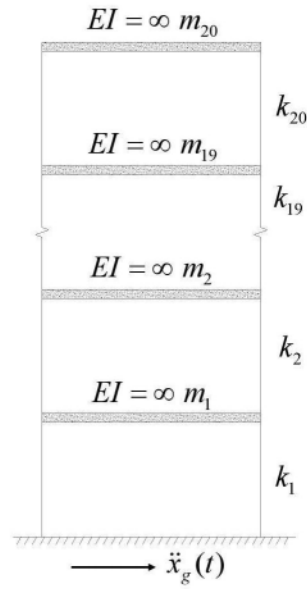


图1

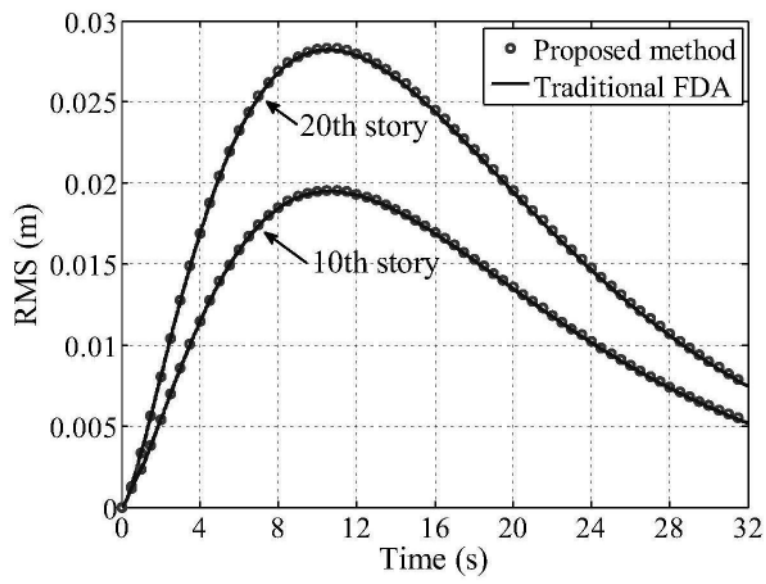


图2

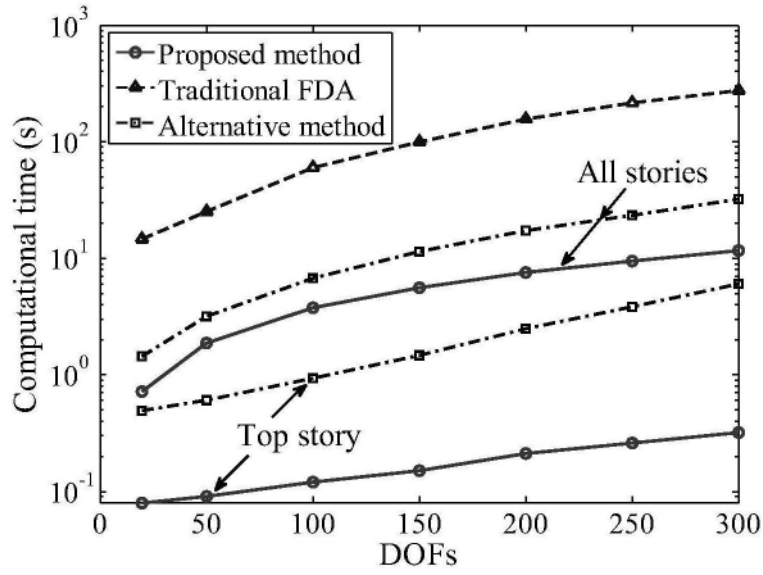


图3

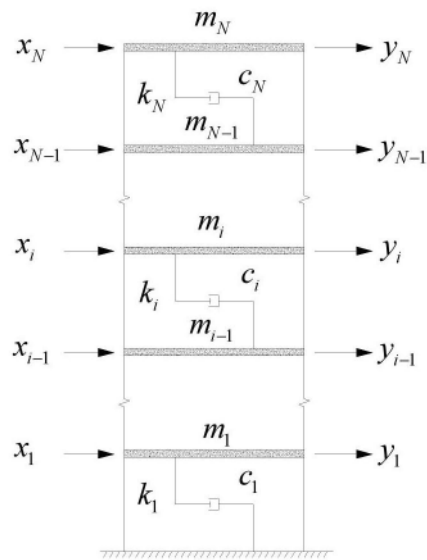


图4

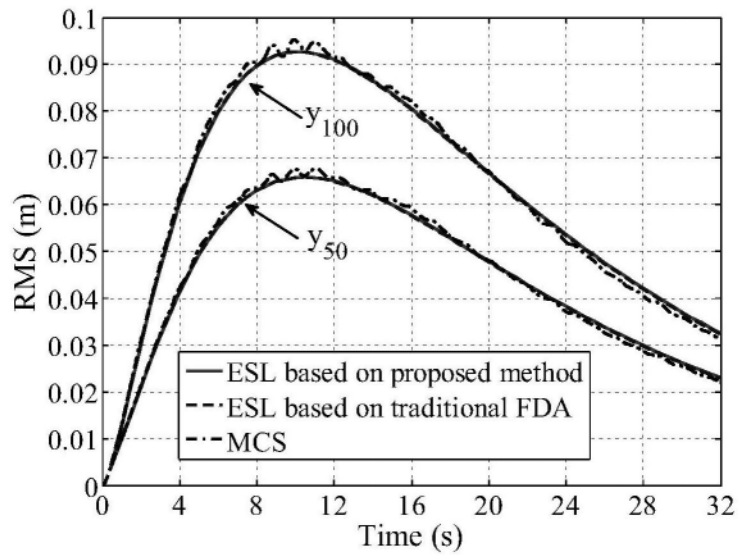


图5

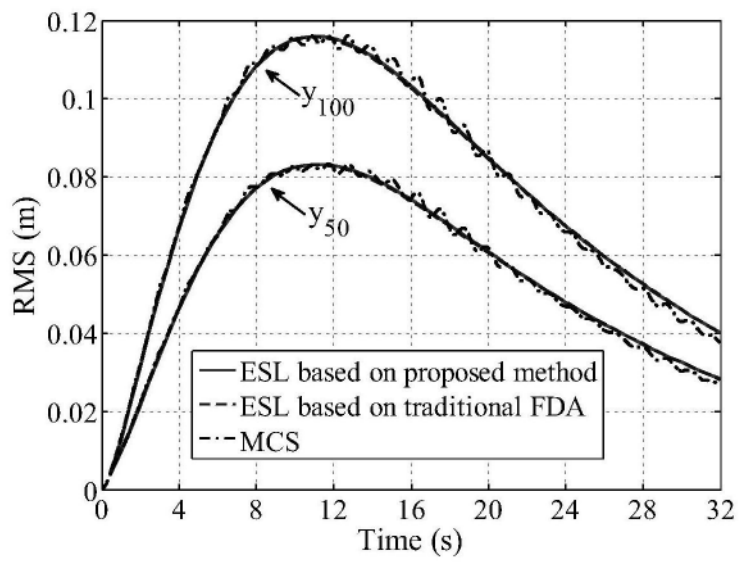


图6