

基础隔震结构橡胶支座时变非线性特性识别^{*}

杜永峰^{1,2}, 赵丽洁², 李万润^{1,2}, 唐少玉²

(1. 西部土木工程防震减灾教育部工程研究中心 兰州, 730050) (2. 兰州理工大学防震减灾研究所 兰州, 730050)

摘要 为了解基础隔震结构在地震作用下的性能状态, 基于小波多尺度分析技术提出一种识别橡胶支座时变非线性恢复力模型的方法。首先, 基于离散序列小波多尺度分析(multi-resolution analysis, 简称 MRA)理论, 将橡胶支座时变非线性未知恢复力采用 Daubechies 小波多尺度分解的小波系数近似表达, 将时变问题转化为时不变问题; 其次, 通过最小二乘法估计各尺度小波系数, 将估计的小波系数进行重构获得橡胶支座的非线性恢复力; 最后, 进行数值模拟验证。数值算例表明, 在上部结构刚度变化时, 该方法可以准确识别出橡胶支座的非线性特性, 同时也可以很好地识别出上部结构的时变刚度, 验证了该算法的有效性和正确性。

关键词 基础隔震结构; 多尺度分析; 时变刚度; 非线性; 橡胶支座

中图分类号 TB12; TU352.1⁺2; TH165⁺.3

引言

由于基础隔震技术具有良好的隔震性能并经历了多次强震的考验, 因此在重大基础设施以及生命线工程中得到广泛应用, 尤其是在地震多发地区。在众多隔震技术中, 采用橡胶支座的基础隔震技术最成熟、应用也最广泛^[1]。由于隔震层部位的水平刚度较小, 对上部结构的约束作用较弱, 隔震建筑在设计、施工和使用等阶段的动力特性与传统结构有很大差别。在地震作用下, 隔震层部位橡胶支座的形态直接关系到隔震结构的隔震性能。准确掌握隔震支座的非线性特性, 不仅能精确反映橡胶隔震支座的动态性能, 而且为橡胶支座损伤鉴定、寿命评估提供可靠手段。因此, 隔震层部位橡胶支座的非线性特性的识别逐渐引起学者们的重视。

时变特性引起的力学问题近年来备受关注。针对土木工程结构时变非线性识别方法, 目前主要是把现代振动控制理论中广义动力学系统辨识研究算法(最小二乘、卡尔曼滤波算法)引入到结构参数识别中^[2-4]。针对隔震结构, 文献[5-7]采用序贯非线性最小二乘方法对简化的 Bouc-Wen 模型模拟隔震支座的动态力学行为, 进而实现非线性参数的估计。雷鹰等^[8]将橡胶支座出现的非线性视为作用于结构的“附加未知虚拟外力”, 通过依次对结构响应进行

卡尔曼预测估计和对“附加未知虚拟外力”的最小二乘识别, 可以识别橡胶支座的非线性力。对于卡尔曼滤波辨识的准确性是以选取合适描述参数轨迹模型为前提的。文献[9]采用同步挤压小波变换能有效识别时变结构及非线性结构的瞬时频率。文献[10-11]采用 MRA 技术对 Bouc-Wen 迟滞非线性模型描述的剪切框架的时变非线性物理参数进行识别, 数值模拟验证了方法的正确性与有效性。文献[12-13]采用连续小波理论和状态空间小波方法对时变系统变不同类型的时变物理参数进行识别。总体上, 目前围绕基础隔震结构的时变非线性模型识别所展开的研究工作还不多, 大都处于起步阶段。

任何瞬时函数都可以用时频定位特性具有卓越成效的小波函数去近似表达与分解^[14]。由于小波变换理论在处理非线性、非平稳信号方面具有独特优势, 因此在结构健康监测领域的应用较为广泛, 逐渐显示其优越性。笔者基于离散序列小波多尺度分析理论, 利用具有双正交滤波特性的 Daubechies 小波将时变物理参数及非线性特性看做离散时间序列信号, 采用尺度函数在尺度空间做一系列展开, 将时变问题转化为时不变问题。采用 Bouc-Wen 迟滞非线性模型模拟隔震橡胶支座的力-变形关系, 建立单层隔震支座和上部结构为三层的基础隔震结构在某一时刻刚度退化的时变模型, 分别对其进行数值模拟, 识别上部结构及隔震层的时变刚度及非线性特

* 国家自然科学基金资助项目(51178211)

收稿日期: 2014-01-19; 修回日期: 2014-04-08

性,力求掌握实际隔震工程在施工、服役期间等各个阶段的隔震支座时变非线性特性变化情况,为橡胶隔震支座性能状态进行初步定量分析。

1 小波多尺度分析识别方法

1.1 小波 MRA 理论

多尺度分析是把平方可积的函数 $f(t) \in L^2(R)$ 看成某一逐级逼近的极限情况,每级逼近都用一个低通平滑函数 $\varphi(t)$ 对 $f(t)$ 作平滑处理,在逐级逼近的同时平滑函数 $\varphi(t)$ 也作伸缩,用不同的分辨率来逐级逼近待分析函数 $f(t)$ ^[15]。

信号的多尺度分解完整表达是由小波函数和尺度函数经过函数空间的尺度、小波空间伸缩和平移得到

$$f(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{j_0,m} \phi_{j_0 m}(t) + \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_{j m} \varphi_{j m}(t) \quad (1)$$

其中: $\phi_{j_0 m}(t) = 2^{j_0/2} \phi(2^{j_0}t - m)$ 为尺度函数 $\phi(t)$ 的伸缩与平移; $\varphi_{j,m}(t) = 2^{j/2} \varphi(2^j t - m)$ 为小波函数 $\varphi(t)$ 的伸缩与平移; $c_{j_0,m}, d_{j,m}$ 分别为尺度系数与小波变换系数。

式(1)第 1 项给出信号 $f(t)$ 在尺度 j_0 的低频分解或是近似描述,第 2 项给出对于每个尺度 j 的高频分解或细节描述。在计算机实现过程中, Mallat 算法把多分辨率与多采样滤波器组紧密结合,在此基础上引出基于离散序列的小波变换。

从计算机实现方面来看,信号的多分辨率分析一般从滤波器的角度来理解。当信号的采样率满足 Nyquist 要求时,归一频带必将限制在 $-\pi \sim \pi$ 之间,分别用一组理想滤波器将信号分解成频带在 $0 \sim \frac{\pi}{2}$

的低频部分和频带在 $\frac{\pi}{2} \sim -\frac{\pi}{2}$ 的高频部分,第 2 级

在 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 分解成频带 $0 \sim \frac{\pi}{4}$ 低频和频带 $\frac{\pi}{4} \sim \frac{\pi}{8}$ 高频;依次类推逐级分解下去,每级输出采样率减半,这样就将 $f(t)$ 进行了多分辨率分解^[15]。相应分解与重构表达式为

$$x_k^{(1)} = \sum_n h_0(n-2k)x_n^{(0)} \quad (2)$$

$$d_k^{(1)} = \sum_n h_1(n-2k)x_n^{(0)} \quad (3)$$

$$x_n^{(0)} = \sum_k g_0^J(n-2k)x_k^{(J)} + \sum_j \sum_k g_1^j(n-2k)d_k^{(j)} \quad (4)$$

其中: h_0, h_1, g_1 和 g_0 分别对应于小波分解与重构

的低通、高通滤波器的冲击响应,即 $x_n^{(0)}$ 在分辨率 J 通过低通器 $h(n)$ 与高通滤波器 $g(n)$ 做逐级分解。

1.2 时变非线性模型识别原理

土木工程结构慢变系统的响应信号主要集中在低频部分^[16]。笔者采取具有正交滤波特性的 Daubechies 小波将时变非线性看做离散时间序列信号仅在尺度空间展开,从工程技术人员易理解的滤波器组角度入手,采用尺度函数相对应的低通重构滤波器 $g_0(n)$ 来表示,即

$$x_n^{(0)} = \sum_k g_0^J(n-2k)x_k^{(J)} \quad (5)$$

仅以单自由度时变非线性系统为例,假设时变非线性结构系统的线性和非线性部分可以分开,其表达式^[17]为

$$m\ddot{x}(t) + c(t)\dot{x} + k(t)x + z(\dot{x}, x, t) = -m\ddot{x}_0(t) \quad (6)$$

若采用增量表达式为

$$m\Delta\ddot{x}(t) + c(t)\Delta\dot{x}(t) + k(t)\Delta x(t) + z(\Delta\dot{x}, \Delta x, t) = -m\Delta\ddot{x}_0(t) \quad (7)$$

将时变参数部分及非线性部分分别进行小波多尺度展开并代入式(7),得到

$$\sum_j g_0^j(n-2^j k)c_{j,k}\Delta\dot{x}(t) + \sum_j g_0^j(n-2^j k)k_{j,k}\Delta x(t) + \sum_j g_0^j(n-2^j k) = -m(\Delta\ddot{x}(t) + \Delta\ddot{x}_0(t)) \quad (8)$$

将所有离散时刻代入式(8),记

$$PA = Q \quad (9)$$

$$p_1 = \begin{bmatrix} g_0^J(1-2^j)\Delta\dot{x}(t_1) & \cdots & g_0^J(1-2^j i)\Delta\dot{x}(t_1) \\ \vdots & & \vdots \\ g_0^J(n-2^j)\Delta\dot{x}(t_n) & \cdots & g_0^J(n-2^j i)\Delta\dot{x}(t_n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$p_2 = \begin{bmatrix} g_0^J(1-2^j)\Delta x(t_1) & \cdots & g_0^J(1-2^j i)\Delta x(t_1) \\ \vdots & & \vdots \\ g_0^J(n-2^j)\Delta x(t_n) & \cdots & g_0^J(n-2^j i)\Delta x(t_n) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$p_3 = \begin{bmatrix} g_0^J(1-2^j) & \cdots & g_0^J(1-2^j i) \\ \vdots & & \vdots \\ g_0^J(n-2^j) & \cdots & g_0^J(n-2^j i) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$P_{n \times (n/2^j+4)} = [p_1, p_2, p_3] \quad (13)$$

$$A_{1 \times (n/2^j+4)} = [c_{J,1} \quad \cdots \quad c_{J,i} \quad k_{J,1} \quad \cdots \quad k_{J,i} \quad z_{J,1} \quad \cdots \quad z_{J,i}]^T \quad (14)$$

$$Q_{n \times 1} = [-m(\Delta\ddot{x}(t_1) + \Delta\ddot{x}_0(t_1)) \quad \cdots \quad -m(\Delta\ddot{x}(t_n) + \Delta\ddot{x}_0(t_n))]^T \quad (15)$$

采用最小二乘估计可以得到位置向量

$$\mathbf{A} = (\mathbf{P}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{Q} \quad (16)$$

根据式(16)求得的小波系数就可重构结构的时变参数和非线性特性。

2 数值算例

2.1 基于 Bouc-Wen 模型的橡胶支座非线性识别

笔者对铅芯橡胶支座进行研究,为模拟橡胶支座系统的非线性特性,采用 Bouc-Wen 迟滞非线性模型模拟隔震橡胶支座的力-变形关系。在地面激励下,橡胶隔震支座的运动方程表达式为

$$m_b \ddot{x}(t) + R_b(\dot{x}, x, z) = -m_b \ddot{x}_g(t) \quad (17)$$

隔震支座的恢复力表达式^[18]为

$$R_b = c_b \dot{x}_b + k_b x_b + (1 - \alpha) F_y z \quad (18)$$

其中: \dot{x} , x 为相对位移和相对速度; c_b 为铅芯橡胶支座的黏性阻尼系数; k_b 为铅芯橡胶支座的初始初始刚度; F_y 为屈服强度; α 为屈服后与屈服强度刚度之比; z 为满足下述非线性的一阶微分方程的无量纲滞回分量^[19]。

$$\dot{q}z = A\dot{x}_b - \gamma|\dot{x}_b|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}_b|z|^n \quad (19)$$

其中: q 为的屈服位移; γ, β, n 和 A 为滞回环的无量纲参数,对滞回环的形状起控制作用,通常情况下由试验确定。

模型参数 $m_b = 3.3 \times 10^5 \text{ kg}$, $c_b = 1.4953 \times 10^6 \text{ Ns/m}$, $k_b = 1.1 \times 10^8 \text{ N/m}$ 。为模拟橡胶支座的迟滞非线性特性, Bouc-Wen 模型的相关参数为 $\beta = 0.5, \lambda = 0.5, n = 1, A = 1, q = 0.015$ 。采用 30 s 的 EL-Centro 地震波作为激励,时间间隔为 0.02 s。运用 Runge-Kutta 方法对微分方程进行迭代求解。

图 1 为橡胶支座的时程曲线。由位移响应可以看出,前 5 s 曲线在中心零线位置上下震荡,5 s 之后开始偏离中心位置,说明隔震支座在地震作用下已经进入了非线性阶段。图 2,3 分别为橡胶支座的刚度与阻尼识别结果对比。由图可知,刚度的识别精度较高,阻尼稍差一些,前 12 s 阻尼识别值在真值附近振荡比较大,但是辨识结果还是很快收敛为一个稳定值,且识别值和理论值基本一致。这是因为在工程结构中结构刚度远远大于阻尼,有时相差 2~4 个数量级,以至于采用最小二乘估计所形成的超定方程中 \mathbf{A} 矩阵内的数值相差较大,因此对阻尼的识别误差稍微大一些。图 4 为恢复力识别结果,识别结果较准确。总体而言,该方法可以很好识别

橡胶隔震支座的刚度及非线性恢复力。

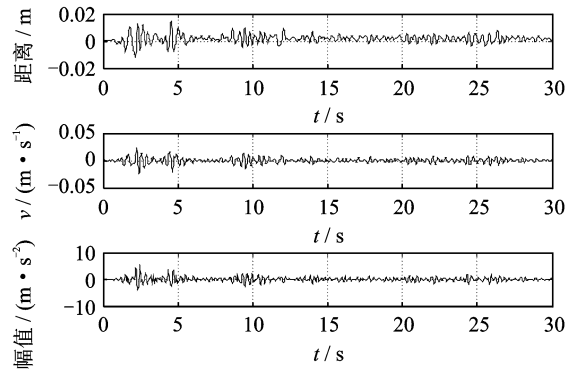


图 1 橡胶支座时程曲线

Fig. 1 Rubber bearings time history curve

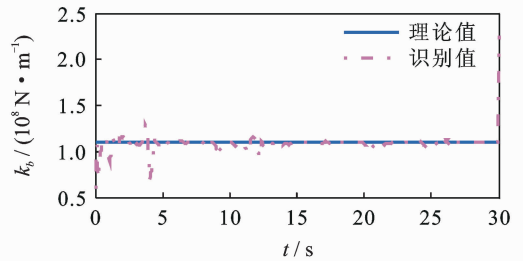


图 2 刚度识别

Fig. 2 Identification results of stiffness

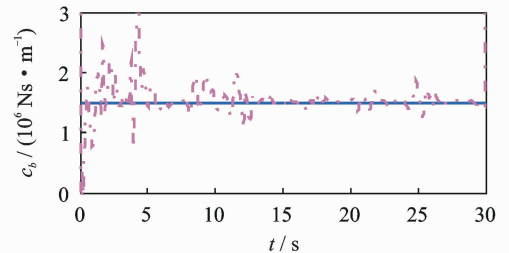


图 3 阻尼识别

Fig. 3 Identification results of damping

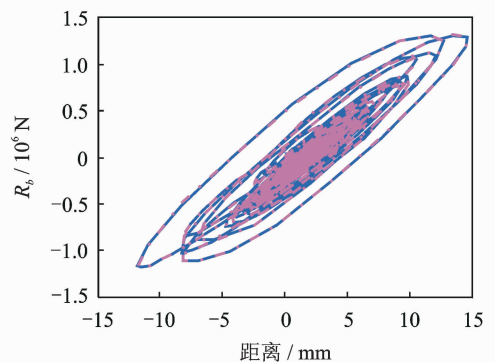


图 4 恢复力识别

Fig. 4 The identification results of the restoring force

2.2 三层隔震结构数值模拟

图 5 为带有橡胶隔震支座的的上部结构为 3 层的

剪切型框架结构模型。上部结构质量为 $m_i = 2.3 \times 10^5 \text{ kg}$ ($i = 1, 2, 3$), 各层刚度 $k_i = 3.9 \times 10^8 \text{ N/m}$ ($i = 1, 2, 3$), 上部结构阻尼比 $\xi_i = 0.05$ 。隔震系统采用铅芯橡胶隔震支座, 隔震层结构参数: 隔震层质量 $m_b = 3.3 \times 10^5 \text{ kg}$, 初始刚度 $k_b = 1.1 \times 10^8 \text{ N/m}$, 隔震支座的黏性阻尼比 $\xi_b = 0.05$ 。在实际隔震工程设计时, 对于橡胶支座的阻尼可以通过阻尼比来得出, 即可计算出 $c_b = 1.4953 \times 10^6 \text{ Ns/m}$ 。假定支座屈服后与屈服前的刚度比 $\alpha = 0.1254$, 铅芯橡胶支座的屈服位移 $q = 0.015$, 铅芯橡胶支座的非线性特性采用的 Bouc-Wen 模型进行描述。当结构受到较强地震作用时, 橡胶隔震支座进入非线性状态。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + R(x, \dot{x}, z) = -M\ddot{x}_g \quad (20)$$

$$R = Kx + H(1 - \alpha)F_{y,z} \quad (21)$$

其中: M 为体系的质量矩阵; K 为刚度矩阵 C 为阻尼矩阵, 阻尼矩阵的形成采用等价剪切型阻尼矩阵^[20]; R 为系统总恢复力列向量, 由弹性恢复力和滞回力两部分组成; $H = [1, 0, 0, 0]^T$ 为隔震层位置向量。

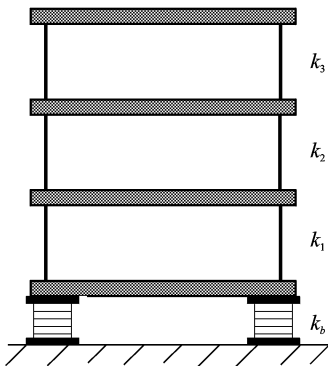


图 5 3层基础隔震剪切框架模型

Fig. 5 A 3-storey shear building with base isolation

将式(21)代入式(20)且联立式(19), 采用状态空间描述法将运动方程写成一阶微分方程形式进行求解。

实际隔震结构工程与普通结构都为时变系统, 为了验证本方法的有效性, 考虑上部结构参数突变时对识别效果的影响。本算例中, 假设结构在受到地震激励作用的过程中, 在 $t = 20 \text{ s}$ 时, 结构的第 3 层的刚度突然下降至 $k_3 = 0.8 \times 3.9 \times 10^8 \text{ N/m}$, 第 2 层刚度突然下降至 $k_2 = 0.7 \times 3.9 \times 10^8 \text{ N/m}$, 为模拟实际测量信号, 在计算得到的响应信号中分别添加一定信噪比 ($\text{SNR} = 70 \text{ dB}$) 的高斯白噪声, 进而识别上部结构的各层刚度及隔震层刚度及非线性恢复力。

从图 6~8 可知, 采用小波所尺度分析技术可以准确识别上部结构的刚度的时变特性, 能够很好地追踪上部参数的变化。图 9, 10 的识别结果表明, 在上部结构物理参数变化的同时也能够较为准确地识别出隔震层橡胶隔震支座的迟滞非线性特性, 对于隔震层的刚度识别误差稍微大些, 但整体识别较好。

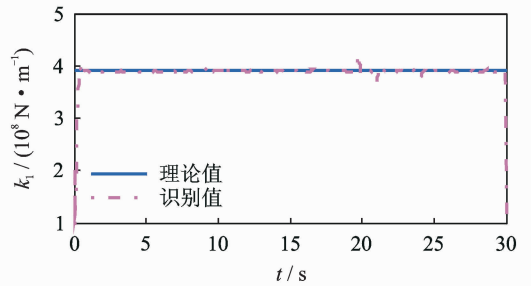


图 6 k_1 时变刚度识别

Fig. 6 Identification results of time-varying stiffness k_1

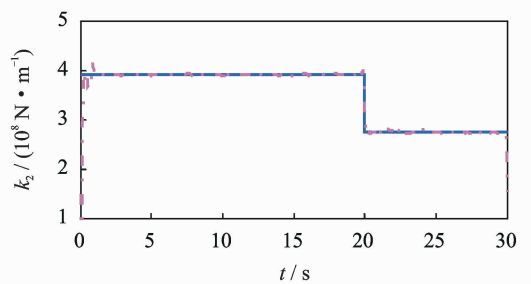


图 7 k_2 时变刚度识别

Fig. 7 Identification results of time-varying stiffness k_2

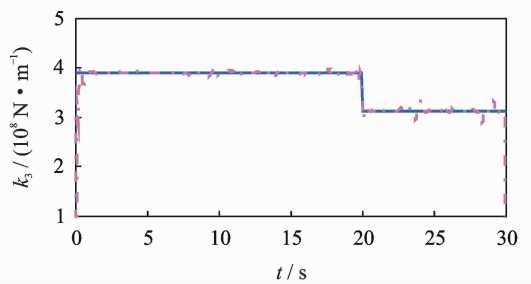


图 8 k_3 时变刚度识别

Fig. 8 Identification results of time-varying stiffness k_1

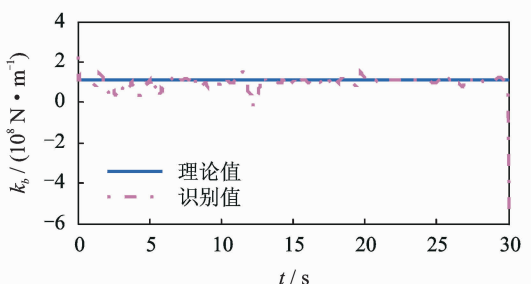


图 9 隔震层刚度 k_b 识别

Fig. 9 Identification results of stiffness k_b in isolation layer

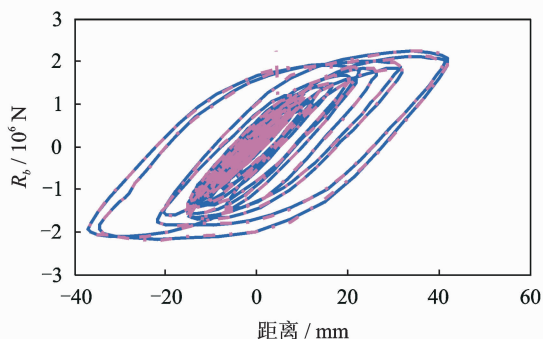


图10 恢复力识别

Fig. 10 Identification of the restoring force

进一步验证了该方法对隔震结构时变非线性特性识别的有效性。

3 结论

1) 笔者对隔震结构的时变参数及橡胶支座时变非线性模型进行小波多尺度展开,将时变问题转化为时不变问题进行最小二乘估计。数值分析结果表明,该方法可以有效识别上部结构刚度变化时的橡胶支座的非线性特性,同时也能准确追踪上部结构刚度的时变特性。不必事先假定非线性系统模型的时变规律,可以避免模型误差对识别结果的影响。

2) 目前,针对隔震结构的时变非线性特性识别处于一个初步探索阶段,在隔震工程实际监测过程中的应用仍需要进一步研究。准确掌握在实际隔震工程中隔震支座的力学性能,可以有效解决利用隔震工程监测数据识别结构体系的非线性特性等难题,为实际隔震工程测试提供一个新技术手段。

参 考 文 献

- [1] 韩建平,王洪涛,李林. 无填充墙基础隔震 RC 框架在环境激励下的动力特性[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(4): 182-187.
Han Jianping, Wang Hongtao, Li Lin. Dynamic characteristics of a base-isolated reinforced concrete frame without infill walls under ambient excitation [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(4): 182-187. (in Chinese)
- [2] 于开平,庞世伟,赵婕. 时变线性/非线性结构参数识别及系统辨识方法研究进展[J]. 科学通报, 2009, 54(20): 3147-3156.
Yu Kaiping, Pang Shiwei, Zhao Jie. Advances in

method of time-varying linear/nonlinear structural system identification and parameter estimate[J]. Chinese Science Bull (Chinese Ver), 2009, 54(20): 3147-3156. (in Chinese)

- [3] 裴强,王丽,全厚辉. 钢筋混凝土框架结构参数时变特性的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(1): 41-46.
Pei Qiang, Wang Li, Quan Houhui. Study on characteristics of time-varying parameters of reinforced concrete frame structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(1): 41-46. (in Chinese)
- [4] 杜永峰,李万润,李慧. 基于测量数据不确定性的结构参数识别[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(4): 629-633.
Du Yongfeng, Li Wanren, Li Hui. Structural parameters identification based on uncertainty of measurement data[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(4): 629-633. (in Chinese)
- [5] 周丽,汪新明,尹强. 利用序贯非线性最小二乘技术识别隔震支座模型的参数[J]. 振动工程学报, 2010, 23(1): 43-47.
Zhou Li, Wang Xinming, Yin Qiang. Parameter identification of rubber-bearings based on sequential nonlinear least-squares technique[J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 23(1): 43-47. (in Chinese)
- [6] 尹强,周丽. 基于 ANLSE 方法的橡胶隔震结构损伤识别[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(5): 730-735.
Yin Qiang, Zhou Li. Identification of rubber isolation structure damage based on ANLSE method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(5): 730-735. (in Chinese)
- [7] 尹强,周丽,汪新明. 基于序贯非线性最小二乘估计的橡胶隔震结构损伤识别[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 9: 375-383.
Yin Qiang, Zhou Li, Wang Xinming. Identification of hysteretic model of rubber-bearing based on sequential nonlinear least-square estimation[J]. Earthquake Engineering & Engineering Vibration, 2010, 9: 375-383.
- [8] 雷鹰,何明煜,林树枝. 结构中基底橡胶隔震支座非线性特性的无模型识别[J]. 振动与冲击, 2013, 32(20): 1-5.
Lei Ying, He Mingyu, Lin Shuzhi. Model-free identification for nonlinear properties of rubber-bearings in base-isolated buildings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(20): 1-5. (in Chinese)
- [9] 刘景良,任伟新,王佐才. 基于同步挤压小波变换的结构瞬时频率识别[J]. 振动与冲击, 2013, 32(18): 37-42.
Liu Jingliang, Ren Weixin, Wang Zuocai. Instantane-

- ous frequency identification based on synchrosqueezing wavelet transformation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013,32(18):37-42. (in Chinese)
- [10] Chang C C, Shi Y. Identification of time-varying hysteretic structures using wavelet multiresolution analysis[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2010(45):21-34.
- [11] Shi Y, Chang C C. Wavelet-based identification of time-varying shear-beam buildings using incomplete and noisy measurement data[J]. *Nonlinear Engineering*, 2013,2:29-37.
- [12] 许鑫,史治宇,Wieslaw J Staszewski,等.利用加速度响应连续小波变换的时变系统物理参数识别[J].*振动工程学报*,2013,26(1):9-14.
Xu Xin, Shi Zhiyu, Wieslaw J Staszewski, et al. Time-varying system physical parameter identification using the continuous wavelet transform of acceleration response[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2013, 26(1):9-14. (in Chinese)
- [13] Xu Xin, Shi Zhiyu. Identification of linear time-varying systems using a wavelet-based state-space method[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012,26: 91-103.
- [14] 蒋永华,汤宝平,陈法法.应用最优重分配小波尺度的小波脊线提取[J].*振动、测试与诊断*,2012,32(1):62-67.
Jiang Yonghua, Tang Baoping, Chen Fafa. Wavelet ridge extraction method based on optimal reassigne wavelet scalogram[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012,32(1):62-67. (in Chinese)
- [15] 杨福生.小波变换的工程分析与应用[M].北京:科学出版社,1999:45-47.
- [16] 任宜春,易伟建,谢献忠.地震作用下结构时变物理参数识别[J].*地震工程与工程振动*,2007,27(4):99-102.
Ren Yichun, Yi Weijian, Xie Xianzhong. Identification of time-variant physical parameters of structure under earthquake loading[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2007,27(4):99-102. (in Chinese)
- [17] Yoshihiro Kitada. Identification of nonlinear structural dynamic systems using wavelets[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998,124(10):1059-1066.
- [18] Jangid R S. Stochastic response of building frames isolated by lead-rubber bearings[J]. *Structural Control Health Monitoring*, 2010,17(1):1-22.
- [19] 李慧,王亚楠,杜永峰.近场地震作用下 TMD-BIS 混合控制体系的非线性响应分析[J].*土木工程学报*,2013,46(S1):57-62.
Li Hui, Wang Yanan, Du Yongfeng. Seismic response analysis for nonlinear base-isolated structure with TMD under near fault ground motions[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(S1):57-62. (in Chinese)
- [20] 党育,杜永峰,李慧.基础隔震结构设计及施工指南[M].北京:中国水利水电出版社,2007:94-96.



第一作者简介:杜永峰,男,1962年3月生,教授、博士生导师。主要研究方向为结构减震控制、结构健康监测等。曾发表《基于刚度需求设计的轻型消能摇摆架减震性态分析》(《土木工程学报》2014年第47卷第1期)等论文。

E-mail: dooyf@lut.cn

通信作者简介:赵丽洁,女,1988年7月生,博士生。主要研究方向为结构健康监测。

E-mail: ljzhaoc@126.com