

基于 WMRA 的隔震结构时变非线性参数识别^{*}

赵丽洁¹, 林东钦¹, 杜永峰², 李万润²

(1. 河北工程大学土木工程学院 邯郸, 056038) (2. 兰州理工大学防震减灾研究所 兰州, 730050)

摘要 基于小波多分辨率分析(wavelet multi-resolution analysis, 简称 WMRA)理论,建立结构时变非线性参数识别方法,研究隔震结构在地震作用下表现出来的时变非线性力学行为。首先,以描述隔震支座的迟滞非线性 Bouc-wen 模型为研究对象,引入 3 阶有效数值差分技术,将运动方程中非线性模型的恢复力增量进行线性化,形成递推观测方程;其次,基于 WMRA 理论,将观测方程中每一待识别参数采用小波多分辨率展开,将模型参数识别问题转化成多元线性回归模型中小波重构系数的估计问题;最后,分别采用数值模拟、串联隔震体系(serial seismic isolation system, 简称 SIS)振动台试验测试数据,识别结构及隔震层参数随时间的演化规律,验证该识别方法的正确性和适用性,为隔震结构在施工、运营期各阶段状态评估提供一定参考。

关键词 隔震结构; 时变非线性; 小波多分辨率; 迟滞非线性模型; 参数识别

中图分类号 TB12; TU352.1⁺2; Th113

引言

近年来,在多例隔震工程的施工阶段出现了橡胶隔震支座侧向位移偏大的现象。特别是在超长和平面形状不规则的隔震结构中,由于隔震支座受外部非荷载因素的影响,如制作缺陷、施工误差等原因,给隔震结构在施工及运营期的全寿命过程中的安全性带来一定的隐患^[1]。建立运营期间隔震支座的力学模型,分析其力学性能,不仅能够准确掌握隔震支座的隔震性能,而且为其在施工、运营期间的损伤程度、寿命评估等提供可靠手段。为此,研究人员建立了多种隔震系统非线性参数模型,并采用不同的方法对模型参数及其非线性特性进行有效识别^[2-4]。文献[5-6]基于简化 Bouc-wen 模型分析隔震支座的非线性力学特性,并采用序贯非线性最小二乘、序贯最小二乘等方法对非线性模型参数进行识别。文献[7]利用扩展卡尔曼估计算法,识别隔震结构中橡胶支座的刚度和阻尼,对隔震结构参数进行有效识别,进而实现隔震结构的非线性识别。文献[8]基于小波多分辨率理论对基础隔震结构的时变非线性进行识别。小波分析作为一种现代时频分析工具,具有很强的时频定位能力,在结构参数识别乃至健康监测领域具有巨大的潜力和应用价值。近

几年,基于小波多分辨率理论在时变线性/非线性结构参数识别方法逐渐引起学者们的关注,并进行了大量研究工作,取得了一些研究成果。文献[9]采用 Morlet 小波变换方法对时变振动系统和典型非线性振动系统进行参数识别。文献[10-12]均基于小波多分辨率分析理论对结构的时变参数进行了有效识别。

笔者采用描述隔震支座的经典 Bouc-wen 迟滞非线性模型为研究对象,首先,通过引入三阶有效差分技术,建立基于小波多分辨率分析理论的隔震结构时变非线性参数识别方法;其次,采用刚度参数突变的两层隔震结构模型进行数值模拟;最后,借助 SIS 振动台模型试验测试数据,识别 SIS 在地震作用下结构时变参数及非线性模型参数的时域演化规律,力求掌握隔震结构在施工、服役期间各阶段的时变非线性力学行为。

1 WMRA 的非线性模型参数识别理论

1.1 WMRA 理论

WMRA 是小波变换中重要理论之一,WMRA 从函数空间的角度可以看作能量有限函数的多分辨

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51578274);河北省高等学校科学技术研究资助项目(QN2017038);河北工程大学创新基金资助项目(17129033058)

收稿日期:2018-04-25;修回日期:2018-07-06

率表达^[13]。把函数空间作逐级二分解产生一组逐级嵌套的子空间

$$\cdots \subset V_{-2} \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset V_2 \subset \cdots \subset L^2$$

或

$$V_j \subset V_{j+1}$$

对 $j \in Z, j$ 是从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 的整数, j 值愈大空间愈大, 其中, $V_{-\infty} = \{0\}, V_{\infty} = L^2$ 。任意一个能量有限的连续信号通过小波多分辨率近似可以表示成函数空间展开形式

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

其中: $\varphi_{j_0, k}(t) = 2^{j_0/2} \varphi(2^{j_0} t - k)$ 和 $\varphi_{j, k}(t) = 2^{j/2} \varphi(2^j t - k)$ 分别为尺度函数 $\varphi(t)$ 和母小波函数 $\varphi(t)$ 的平移和伸缩的函数簇; $c_{j_0, k}$ 和 $d_{j, k}$ 分别为在尺度 j_0 和 j 上的展开系数。

式(1)中第1项给出了 $f(t)$ 的低频分量或近似表达; 第2项给出了对于不同分辨率尺度 j 的高频分量或细节表达。

1.2 参数识别

本研究在 WMRA 基础上引入三阶有效差分方法, 建立非线性模型参数识别方法。以单自由度迟滞非线性模型为例, 运动方程为

$$m\ddot{x}(t) + r(\hat{x}, x) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

假设系统的总恢复力采用经典 Bouc-wen 模型描述, 表达式如下

$$\hat{r} = c\ddot{x} + k\hat{x} - \beta|\hat{x}|r|r|^{n-1} - \gamma\hat{x}|r|^n \quad (3)$$

其中: x 为相对位移, $r(x, \hat{x}) = F_c(\hat{x}) + F_s(x)$ 为总恢复力; c 为阻尼系数; k 为等效刚度; β, γ 为控制滞回环形状的参数; n 为控制滞回环的光滑程度的参数。

为简化计算, 通常把滞回参数设定为 $n=2$ 。待识别模型参数向量为 $[c \ k \ \beta \ \gamma]$ 。假设采样数据长度为 N_t , 令 $t_k = k\Delta t (k=0, 1, \dots, N_t-1)$, Δt 为采样间隔, 将式(2)离散化并转化成观测方程形式

$$r_k = -m(\ddot{x}_{g, k} + \ddot{x}_k) \quad (4)$$

其中: $r_k = r(t_k)$, $\ddot{x}_{g, k} = \ddot{x}_g(t_k)$, $\ddot{x}_k = \ddot{x}(t_k)$, $\hat{x}_k = \hat{x}(t_k)$ 。

为了将式(3)、式(4)合并, 利用三阶有效差分技术对 r_k 与 \dot{r}_k 进行线性化^[14]。因此, 在 t_{k-1} 与 t_{k-2} 之间的恢复力增量 r 可以表示为

$$r_k - r_{k-1} = (\Delta t/12)(5\dot{r}_k + 8\dot{r}_{k-1} - \dot{r}_{k-2}) \quad (5)$$

将待识别模型参数 c, k, β, γ 表示成向量 θ_k 的形式, $\theta_k = [c, k, \beta, \gamma]^T$, 将式(3)、式(4)带入式(5), 并定义观测向量

$$y_k = (12/\Delta t)(r_k - r_{k-1}) = (-12m/\Delta t)(\ddot{x}_k - \ddot{x}_{k-1} + \ddot{x}_{g, k} - \ddot{x}_{g, k-1}) \quad (6)$$

由式(5)形成观测方程

$$y_k = \varphi_k \theta_k + \varepsilon_k \quad (7)$$

其中: ε_k 为测量噪声。

由式(6)可知, 观测向量 y_k 可以通过输入、输出测得。由式(6)、式(7)可得

$$5\dot{r}_k + 8\dot{r}_{k-1} - \dot{r}_{k-2} = y_k \quad (8)$$

将式(3)带入式(8), 并利用式(3)可以得到式(7)中系数矩阵表达式

$$\varphi_k = [\varphi_{k,1}, \varphi_{k,2}, \varphi_{k,3}, \varphi_{k,4}] \quad (9)$$

其中

$$\varphi_{k,1} = 5\ddot{x}_k + 8\ddot{x}_{k-1} - \ddot{x}_{k-2} \quad (10a)$$

$$\varphi_{k,2} = 5\dot{x}_k + 8\dot{x}_{k-1} - \dot{x}_{k-2} \quad (10b)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{k,3} = & 5|\dot{x}_k| |m(\ddot{x}_k + \ddot{x}_{g, k})|^{n-1} m(\ddot{x}_k + \ddot{x}_{g, k}) + \\ & 8|\dot{x}_{k-1}| |m(\ddot{x}_{k-1} + \ddot{x}_{g, k-1})|^{n-1} m(\ddot{x}_{k-1} + \ddot{x}_{g, k-1}) - \\ & |\dot{x}_{k-2}| |m(\ddot{x}_{k-2} + \ddot{x}_{g, k-2})|^{n-1} m(\ddot{x}_{k-2} + \ddot{x}_{g, k-2}) \end{aligned} \quad (10c)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{k,4} = & -5\dot{x}_k |m(\ddot{x}_k + \ddot{x}_{g, k})|^n - 8\dot{x}_{k-1} |m(\ddot{x}_{k-1} + \\ & \ddot{x}_{g, k-1})|^n + \dot{x}_{k-2} |m(\ddot{x}_{k-2} + \ddot{x}_{g, k-2})|^n \end{aligned} \quad (10d)$$

采用 WMRA 可以将模型参数识别问题转化为多元线性回归模型中的时不变小波重构系数 $\{c\}$ 和 $\{d\}$ 的估计问题^[15], 将观测方程未知数系数 θ 采用小波多分辨率近似展开

$$\theta \approx \mathbf{W}\mathbf{\Xi} \quad (11)$$

其中: $\mathbf{\Xi} = [\xi_c^T, \xi_k^T, \xi_\beta^T, \xi_\gamma^T]^T$ 为小波展开系数矩阵; $\xi_i = [\xi_c \ \xi_d]^T, i=1, 2, 3, 4; \xi_c = [c_{j_0, k_0} \ \cdots \ c_{j_0, K_0}]^T; \xi_d = [d_{j_0, k_0} \ d_{j_0, k_0+1} \ \cdots \ d_{j_0, K_0} \ \cdots \ d_{j, K_j}]^T; \mathbf{W} = \text{diag}[\omega_c, \omega_k, \omega_\beta, \omega_\gamma]$ 为相应的小波展开重构矩阵; ξ_i, ω_i 分别为模型参数 c, k, β, γ 的小波展开系数向量和小波基函数重构矩阵。

将式(11)代入式(7)可得如下表达式

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Q}\mathbf{\Xi} + \varepsilon = \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{q}_l + \varepsilon \quad (12)$$

式(11)可以看作矩阵 \mathbf{Q} 的 l 列回归分析, \mathbf{q}_l 可以看作第 l 列的回归向量, α_l 为第 l 个重构系数, L 为回归因子的数目, 即 $\mathbf{\Xi}$ 的总数目。

$$\mathbf{Q} = \mathbf{\Gamma}\mathbf{W} \quad (13)$$

其中: \mathbf{Q} 包含结构响应 $\mathbf{\Gamma}$ 和在不同分辨率下小波函数的采样值 \mathbf{W} 。

由式(13)可知, 小波系数展开 $\mathbf{\Xi}$ 可以通过线性最小二乘伪逆解得到, 表达式如下

$$\mathbf{\Xi} \approx \mathbf{Q}^+ \mathbf{Y} \quad (14)$$

Q^+ 为 Q 的伪逆,将 Ξ 回代到式(11)得到相应模型参数。

2 数值模拟

为验证算法的正确性,将隔震结构隔震层上部考虑成线性结构,隔震层采用简化的 *Bouc-wen* 迟滞非线性模型描述,并通过改变结构刚度参数来模拟结构突变情况。以两层的隔震结构为例,上部结构参数 $m_1 = 125 \text{ kg}$, $c_1 = 0.07 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, $k_1 = 24.5 \text{ kN/m}$ 。隔震层 $m_b = 125 \text{ kg}$, $c_b = 0.07 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, $k_b = 24.5 \text{ kN/m}$ 。隔震层的非线性模型参数为 $\beta = 0.5$, $\gamma = 0.5$, $n = 2$ 。为使隔震结构进入非线性耗能阶段,输入加速度幅值 0.51 g 、时长为 30 s 的地震动,模拟在罕遇地震激励下进行上部结构参数及隔震层模型参数的识别。预设激励在 $t = 15 \text{ s}$

时,刚度从 $k_1 = 24.5 \text{ kN/m}$ 突降到 19.6 kN/m ,模拟上部结构发生刚度突变,同时隔震层的初始刚度由 $k_1 = 24.5 \text{ kN/m}$ 突降到 19.6 kN/m 。为模拟实际情况,在测量响应中均加入信噪比 $\text{SNR} = 50 \text{ dB}$ 的噪声,待识别参数向量 $\theta = [c_1 \ k_1 \ c_b \ k_b \ \beta]$,采用上一节中所提的识别理论用以识别隔震结构参数。

图1为各层结构参数及模型参数理论值与识别值的对比曲线。图(a),(b),(d),(e)为考虑上部结构及隔震层刚度发生变化时,每层结构参数的识别值,发现阻尼系数识别效果很好,刚度参数在突变前识别效果较好,在刚度突变后识别值在真值附近上下波动,但可以在较短时间内迅速准确跟踪上部结构刚度及隔震层刚度的突变情况。图(c),(f)为隔震层模型参数理论值与识别值的对比曲线,同样识别效果较好。

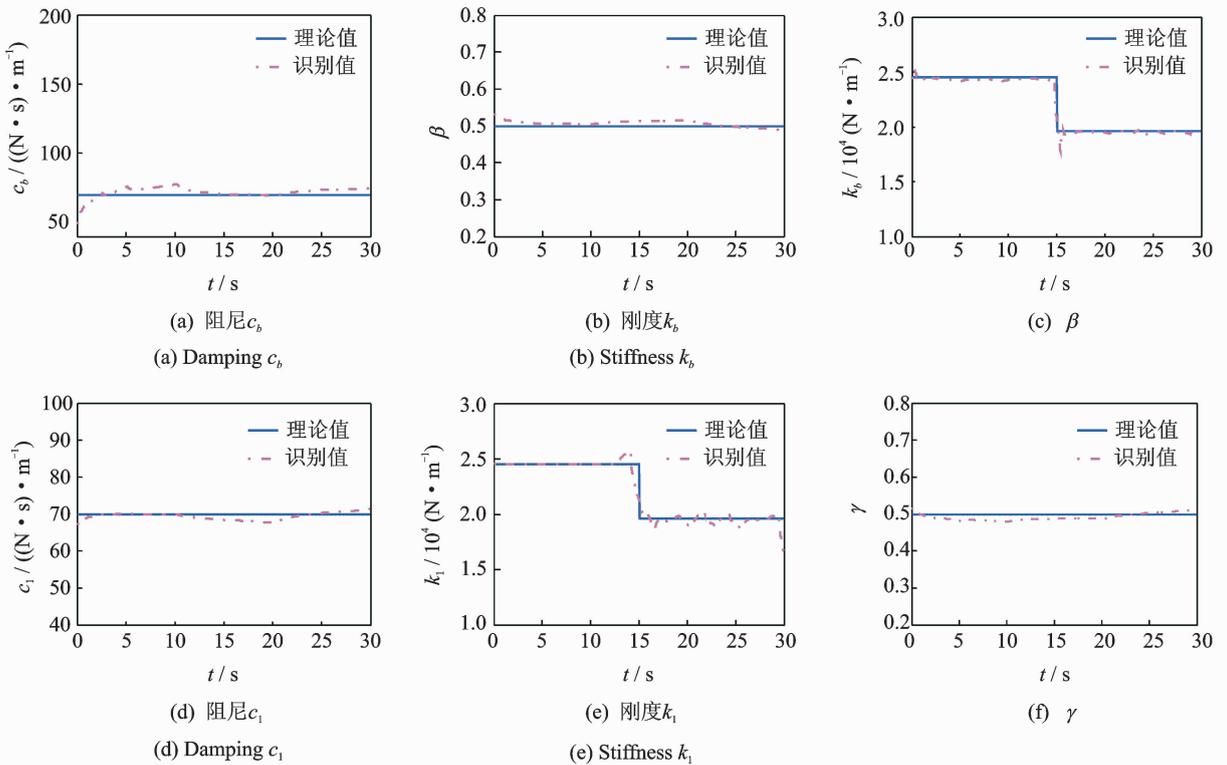


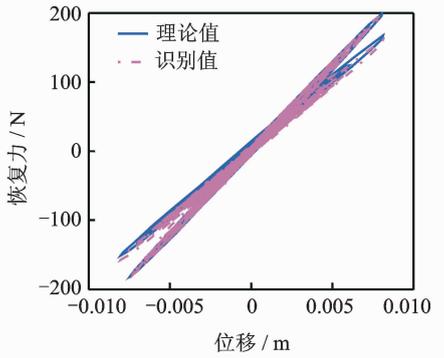
图1 各层结构参数及模型参数理论值与识别值

Fig.1 Theoretical value and identification value of each layer structure and model parameter

图2所示为恢复力与位移形成的滞回曲线识别值与理论值的对比情况。图(a)为上部结构滞回曲线识别情况,由于上部结构假定为线性,在刚度突变后,滞回曲线仍然类似于直线。图(b)为隔震层滞回曲线识别情况,可以发现刚度改变前后识别值与理论值吻合均较好,滞回曲线形状饱满,隔震层表现出明显的耗能特点,进一步验证了该方法的有效性。

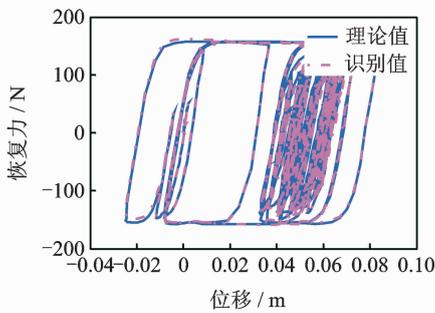
3 串联隔震结构振动台试验分析

为进一步验证所提识别方法的适用性,借助课题组在广州大学工程抗震研究中心所做的 SIS 振动台模型试验数据,建立描述串联隔震体系的 Bouc-wen 模型,并对其进行参数识别。SIS 试验模型是



(a) 上部结构滞回曲线

(a) Hysteresis curve of the superstructure



(b) 隔震层滞回曲线

(b) Hysteresis curve of isolation layer

图2 滞回曲线理论值与识别值

Fig. 2 Theoretical value and identification value of hysteresis curve

由橡胶支座、钢筋混凝土柱及配重板组成,如图3所示。根据试验条件、地震波分类及串联柱的高度分为不同组测试工况,每一组工况根据不同的地震激励幅值、不同输入方向($x/y/z$)又分为若干测试工况,具体测试工况见文献[16]。采用串联柱高为1 m、振动台输入激励为8度0.2 g的 x 向远场地震波CC4的测试工况(CC4X_0.2 g)数据进行分析,该组测试工况能够使SIS进入非线性耗能阶段。



图3 试验模型

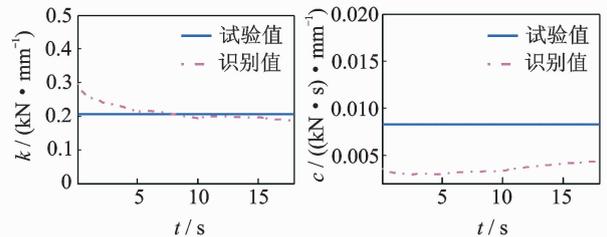
Fig. 3 Test model

表1为试验测得模型隔震支座的水平等效刚度与等效阻尼比数值^[16],其中阻尼系数由计算得到。图4为CC4X_0.2 g工况下,模型参数试验值与识别值的对比曲线。由于试验中模型参数 β 和 γ 未知,图中仅给出其识别值曲线如图(c)和(d)所示。图(a)和(b)为等效刚度识别值与试验值的对比曲线,识别值随着时间的增长逐渐接近于试验值,而等效阻尼的识别值与试验值相差较大。分析其原因:a. 试验值是隔震支座在力学性能测试时的100%剪切变形条件下得到实测值,识别值是根据该工况实测数据识别得到,而在试验过程中,支座并没有完全达到100%剪切变形,因此阻尼系数与试验值相比数值偏小;b. 图中用于对比的试验值是仅针对橡胶支座测试的力学参数值,而识别值是基于整体SIS试验模型,包括橡胶隔震支座及下部的串联柱,因此也会对识别结果产生一定的影响。

表1 隔震支座的水平基本力学性能

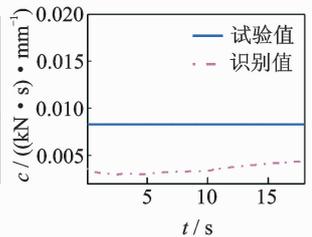
Tab. 1 The horizontal basic mechanical properties of the rubber bearing

支座型号	$k_{\text{eff}} / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	ζ_{eff}	$c_{\text{eff}} / ((\text{kN} \cdot \text{s}) \cdot \text{mm}^{-1})$
LRB90-15	0.206	0.185	0.008 3



(a) 等效刚度

(a) Equivalent stiffness



(b) 等效阻尼

(b) Equivalent damping

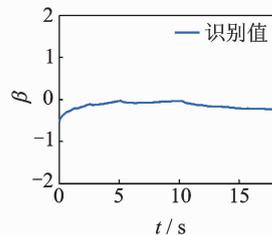
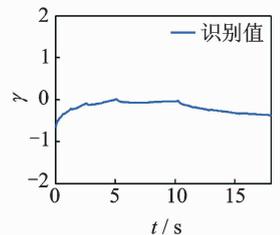
(c) β (d) γ

图4 CC4X_0.2 g工况下参数试验值与识别值对比

Fig. 4 Comparison of the experiment value and the identification value of the parameters for CC4X_0.2 g

图5为CC4X_0.2 g工况下滞回曲线、瞬时刚度试验值与识别值对比曲线。图(a)为由参数识别值计算得滞回曲线与实测滞回曲线对比情况,识别

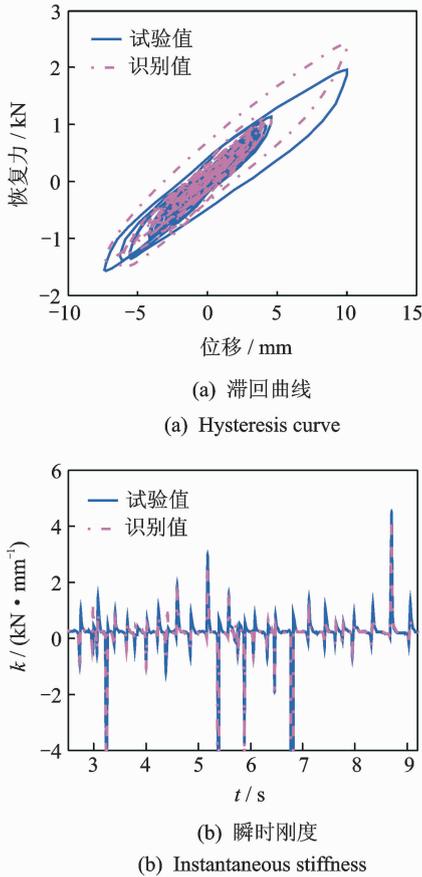


图5 CC4X_0.2 g 工况下滞回曲线、瞬时刚度试验值与识别值比较

Fig. 5 Comparison between identification value and identification value of hysteresis loops, instantaneous stiffness for CC4X_0.2 g

值相对于试验值向上有所偏移,但是整体滞回曲线形状与实测的滞回曲线基本吻合。图(b)为瞬时刚度识别值与试验值对比曲线,除个别异常值外,整体识别效果较好。

4 结论

1) 通过数值分析表明,小波多分辨率识别方法可以有效识别结构刚度退化时的结构参数及隔震层模型参数的变化规律。

2) 借助 SIS 的振动台试验测试数据,建立了包含 4 个未知参数的简化 Boun-wen 迟滞非线性模型,识别其等效刚度、等效阻尼及非线性参数值,并与试验值进行对比分析。结果表明,该方法可以有效识别 SIS 的结构及模型参数,进一步验证了方法的适用性,为在施工、运营期等阶段力学性能状态的准确评估提供一定参考。

参 考 文 献

- [1] 杜永峰,赵丽洁,张韬. 超长复杂隔震结构施工力学及全过程监测研究[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 1-10.
Du Yongfeng, Zhao Lijie, Zhang Tao. Study on construction mechanics of long complicated isolated structures and life-cycle monitoring[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 1-10. (in Chinese)
- [2] Chang C H. Modeling of laminated rubber bearings using an analytical stiffness matrix[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(24): 6055-6078.
- [3] Furukawa T, Ito M, Izawa K, et al. System identification of base-isolated building using seismic response data[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(3): 268-275.
- [4] 江宜城,聂肃非,叶志雄,等. 多铅芯橡胶隔震支座非线性力学性能试验研究及其显式有限元分析[J]. 工程力学, 2008, 27(7): 11-16.
Jiang Yicheng, Nie Sufei, Ye Zhixiong, et al. Experimental study on mechanical properties of multi-lead rubber bearing and its explicit finite element analysis[J]. Engineering Mechanics, 2008, 27(7): 11-16. (in Chinese)
- [5] Yin Qiang, Zhou Li, Wang Xinming. Parameter identification of hysteretic rubber-bearing based on sequential nonlinear least-square estimation [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 9(3): 375-383.
- [6] 尹强,周丽. 基于 ASNLSE 方法的橡胶隔震结构损伤识别[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(5): 710-715.
Yin Qiang, Zhou Li. Damage identification for rubber-bearing isolated structure based on ASNLSE method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(5): 710-715. (in Chinese)
- [7] 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): 1-4.
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): 1-4. (in Chinese)
- [8] 杜永峰,赵丽洁,李万润,等. 基础隔震结构橡胶支座时变非线性特性识别[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(1): 86-91.

- Du Yongfeng, Zhao Lijie, Li Wanrun, et al. Identification for time-varying nonlinear properties of rubber-bearings in base isolated buildings[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(1): 86-91. (in Chinese)
- [9] 黄东梅, 周实, 任伟新. 基于小波变换的时变及典型非线性振动系统识别[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(13): 124-129.
Huang Dongmei, Zhou Shi, Ren Weixin. Parameter identification of time-varying and typical nonlinear vibration system based on wavelet transform[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(13): 124-129. (in Chinese)
- [10] Shi Yuanfeng, Chang C C. Wavelet-based identification of time-varying shear-beam buildings using incomplete and noisy measurement data[J]. *Nonlinear Engineering*, 2013, 2(12): 29-37.
- [11] 许鑫, 史治宇, Wieslaw J S, 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): 8-14.
Xu Xin, Shi Zhiyu, Wieslaw J S, et al. Time-varying system physical parameters identification using the continuous wavelet transform of acceleration response [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2013, 26(1): 8-14. (in Chinese)
- [12] 王超, 朱宏平, 吴巧云, 等. 基于小波多分辨率分析的结构时变参数识别[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(10): 31-35.
Wang Chao, Zhu Hongping, Wu Qiaoyun, et al. Time-varying parameter identification of structure using wavelet multiresolution analysis [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2016, 44(10): 31-35. (in Chinese)
- [13] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 50-53.
- [14] Yang J N, Lin S. On-line identification of non-linear hysteretic structures using an adaptive tracking technique[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2004(2): 1481-1491.
- [15] 赵丽洁, 杜永峰, 李万润, 等. 基于小波多分辨率分析的时变结构参数识别研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(9): 94-102.
Zhao Lijie, Du Yongfeng, Li Wanrun, et al. Physical parameter identification of time-varying structure based on wavelet multi-resolution analysis [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(9): 94-102. (in Chinese)
- [16] 杜永峰, 吴忠铁, 朱前坤. 基于试验的串联隔震体系非线性力学性能有限元分析[J]. *土木工程学报*, 2015(7): 20-29.
Du Yongfeng, Wu Zhongtie, Zhu Qiankun. Finite element analysis of nonlinear mechanical behavior of series seismicisolation system based on tests [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015(7): 20-29. (in Chinese)



第一作者简介:赵丽洁,女,1988年7月生,讲师、硕士生导师。主要研究方向为结构健康监测。曾发表《基于小波多分辨率的时变结构参数识别研究》(《工程力学》2016年第33卷第9期)等论文。

E-mail: ljzhaocz@126.com

通信作者简介: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。

E-mail: dooyf@sohu.com

