

基于 ASNLSE 方法的橡胶隔震结构损伤识别*

尹强^{1,2}, 周丽²

(1. 南京理工大学机械工程学院 南京, 210094)

(2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 对橡胶隔震结构的在线损伤识别进行了实验研究。建立橡胶隔震结构实验模型, 对其进行振动台实验。采用一套刚度元件装置 (SED) 在线实现结构的层间刚度突变, 模拟结构损伤。对结构施加不同地震波基础激励, 测量结构各层的加速度响应和基础加速度信号, 提出自适应序贯非线性最小二乘 (adaptive sequential nonlinear least square estimation, 简称 ASNLSE) 方法, 基于测得的加速度信号对橡胶隔震结构的参数及其变化和隔震结构各层位移进行在线识别, 判断结构损伤的位置和程度。实验结果表明, ASNLSE 方法能够准确识别橡胶隔震结构的参数, 并追踪结构参数的变化, 且识别的位移与实测位移曲线吻合良好, 验证了该方法在基础隔震结构损伤识别中的有效性和准确性, 具有实际应用价值。

关键词 自适应序贯非线性最小二乘; 橡胶隔震结构; 迟滞模型; 参数识别; 损伤诊断

中图分类号 N945.14; O327; TP391.9

引言

基础隔震技术把地震对建筑物的损伤减小或者予以避免^[1]。近年来, 隔震技术在国内、外的应用越来越广泛, 高阻尼橡胶支座隔震系统在建筑和桥梁上得到了应用, 由于能显著减弱结构在遭受地震及其他动载荷的响应, 这些基础隔震系统得到越来越广泛的应用^[1-2]。为确保基础隔震系统的完整性和安全性, 需要发展与之相匹配的结构健康监测系统。橡胶隔震支座健康监测面临的一个挑战性问题是其迟滞非线性行为, 因此必须建立橡胶隔震支座的迟滞非线性模型。国内、外学者提出了多种不同的迟滞模型, 包括双线性模型^[3]、MSS 模型^[4]和 Bouc-Wen 模型^[5-6]等。其中, Bouc-Wen 模型更具灵活性, 因含有数量适中的可调节模型参数而得到了广泛应用。

在结构健康监测中, 当破坏发生时能够立即对结构的损伤作出判断和评估是一项非常重要的工作。当结构由于遭受动荷载而发生损伤时, 损伤信息将会包含在结构的振动信号中。通过对振动信号进行时域分析, 可以识别出结构的损伤。为此, 基于结构振动信号测量的系统辨识和损伤识别技术成为当前研究的热点。众多学者研究了各种不同的参数识别和损伤诊断技术, 包括最小二乘估计 (LSE)^[7-8]、

序贯非线性最小二乘法 (SNLSE)^[5-6,9]、贝叶斯估计^[10]、广义卡尔曼滤波 (EKF)^[11-12]、蒙特卡罗滤波^[13]、粒子滤波^[14]、二次误差平方和方法^[15]、模型参考方法^[16]和支持向量机^[17]等。在这些方法中, EKF 方法是最常用也较为有效的参数识别方法, 但需对状态方程线性化, 导致递归解 (或估计值) 可能容易变得不稳定。另一方面, 由于进行了线性化处理, 当初始参数估计值超出收敛范围时, 解可能会不收敛。SNLSE 方法克服了 EKF 方法的不足, 仅需测量结构加速度信号即可识别结构参数、结构速度和位移响应。近来, 一种基于约束非线性最优化的自适应追踪技术被用来在线追踪结构的时变参数^[8]。数值仿真和线性结构剪切梁模型实验研究表明, 该自适应追踪技术能够有效追踪结构参数的变化。

笔者将该自适应追踪技术和 SNLSE 方法相结合, 提出一种自适应序贯非线性最小二乘法 (ASNLSE) 用于结构在线损伤识别。对基础隔震结构在线损伤识别进行实验研究, 采用工程上使用的 GZN 110 型橡胶隔震支座建立橡胶隔震层, 通过在隔震层上增加剪切梁框架模型建立隔震结构实验模型。采用 Bouc-Wen 模型描述橡胶隔震层的迟滞非线性特性, 对橡胶隔震结构实验模型进行振动台实验。基于测量的加速度信号和自适应序贯非线性最小二乘法在线识别模型的参数及其变化, 并将识别

* 国家自然科学基金资助项目 (编号: 11172128, 10572058); 国家自然科学基金国际 (地区) 合作与交流资助项目 (编号: 61161120323); 江苏省六大人才高峰资助项目 (编号: 2010JZ004)

收稿日期: 2011-11-04; 修改稿收到日期: 2012-04-09

的位移与测量值进行对比。实验结果表明,ASNLSE方法能有效追踪结构参数的变化,识别结构损伤,且识别的位移和实际测量得到的位移曲线吻合良好。

1 自适应序贯非线性最小二乘法

m 个自由度结构的动力学方程可以表示为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{F}_c[\dot{\mathbf{x}}(t)] + \mathbf{F}_s[\mathbf{x}(t)] = \eta\mathbf{f}(t) \quad (1)$$

其中: \mathbf{M} 为 $(m \times m)$ 维质量矩阵; $\mathbf{x}(t) = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ 为 m 维位移向量; $\mathbf{F}_c[\dot{\mathbf{x}}(t)]$ 为 m 维耗散恢复力向量; $\mathbf{F}_s[\mathbf{x}(t)]$ 为 m 维刚度恢复力向量; $\mathbf{f}(t)$ 为激励向量; η 为激励影响系数矩阵。

加速度响应和激励信号为被测量的量,未知的需要被识别的状态向量为 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}^T, \dot{\mathbf{x}}^T]^T$, 包括了位移和速度向量。待定参数向量为 θ , 包含了 n 个未知参数,如刚度和阻尼等。根据式(1)得到系统观测方程为

$$\varphi[\mathbf{X}; t] \theta(t) + \mathbf{e}(t) = \mathbf{y}(t) \quad (2)$$

其中: $\mathbf{y}(t) = \eta\mathbf{f}(t) - \mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t)$ 为已知的 m 维测量数据; $\varphi[\cdot]$ 为 $(m \times n)$ 维数据矩阵; $\mathbf{e}(t)$ 为 m 维模型噪声向量; $\theta(t) = [\theta_1(t), \theta_2(t), \dots, \theta_n(t)]^T$ 为系统的未知参数向量。

在 $t = t_k = k\Delta t$ 时刻(其中 Δt 为数据采集时间间隔),式(2)可以离散为

$$\varphi_k(\mathbf{X}_k) \theta_k + \mathbf{e}_k = \mathbf{y}_k \quad (3)$$

其中: $\varphi_k = \varphi[\mathbf{X}(t_k); t_k]$; $\theta_k = \theta(t_k)$; $\mathbf{e}_k = \mathbf{e}(t_k)$; $\mathbf{y}_k = \mathbf{y}(t_k)$ 。

\mathbf{X}_k 和 θ_k 为待识别的系统未知向量,因此式(3)为求解 \mathbf{X}_k 和 θ_k 的非线性方程。

不同于EKF方法将 \mathbf{X}_k 和 θ_k 合成一个广义状态向量同时求解,SNLSE方法将分两步求解 \mathbf{X}_k 和 θ_k 。首先,假设 \mathbf{X}_k 已知,由最小二乘(LSE)解确定 θ_k ;其次,通过非线性最小二乘法求解 \mathbf{X}_k 。求解过程如下:

1) 假设 \mathbf{X}_k 已知且系统未知参数向量 θ_k 为常量,即 $\theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_k$ ($\dot{\theta} = 0$),最小化目标函数(误差平方和)

$$\mathbf{J}(\theta) = \sum_{i=1}^{k+1} [\mathbf{y}_i - \varphi_i(\mathbf{X}_i) \theta_i]^T [\mathbf{y}_i - \varphi_i(\mathbf{X}_i) \theta_i] \quad (4)$$

可以得到 θ_{k+1} 的经典最小二乘递归解,通过引入自适应因子矩阵在线优化误差协方差矩阵 \mathbf{P}_k 得到时变结构参数的递归解 $\hat{\theta}_{k+1}$ 为

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + \mathbf{K}_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1}) [\mathbf{y}_{k+1} - \varphi_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1}) \hat{\theta}_k] \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_{k+1} = (\Lambda_{k+1} \mathbf{P}_k \Lambda_{k+1}^T \varphi_{k+1}^T [\mathbf{I} +$$

$$\varphi_{k+1} (\Lambda_{k+1} \mathbf{P}_k \Lambda_{k+1}^T \varphi_{k+1}^T)^{-1} \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \varphi_{k+1}^T] (\Lambda_{k+1} \mathbf{P}_k \Lambda_{k+1}^T) \quad (7)$$

其中: $\mathbf{K}_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1})$ 为LSE方法的增益矩阵; Λ_{k+1} 为一对角矩阵,称作自适应因子矩阵,用于在线追踪结构参数的变化^[8]。

2) 从式(5)~式(7)可以看出, $\hat{\theta}_{k+1}$ 为系统未知状态向量 \mathbf{X}_{k+1} 的函数,即 $\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1})$;因此式(4)中的目标函数可以写为

$$\mathbf{J}_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1}) = \sum_{i=1}^{k+1} [\mathbf{y}_i - \varphi_i(\mathbf{X}_i) \hat{\theta}_i(\mathbf{X}_i)]^T [\mathbf{y}_i - \varphi_i(\mathbf{X}_i) \hat{\theta}_i(\mathbf{X}_i)] \quad (8)$$

系统未知状态向量 \mathbf{X}_{k+1} 的估计值 $\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1}$ 可以通过进一步优化关于 \mathbf{X}_{k+1} 的非线性目标函数得到

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1} = \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k} + \bar{\mathbf{K}}_{k+1} [\mathbf{y}_{k+1} - \hat{\mathbf{y}}_{k+1}(\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k})] \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k} = \mathbf{X}_{k|k} + \mathbf{B}_1 \dot{\mathbf{x}}_k + \mathbf{B}_2 \ddot{\mathbf{x}}_{k+1} \quad (10)$$

$$\bar{\mathbf{K}}_{k+1} = \bar{\mathbf{P}}_{k+1|k} \Psi_{k+1,k}^T [\mathbf{I} + \Psi_{k+1,k+1} \bar{\mathbf{P}}_{k+1|k} \Psi_{k+1,k+1}^T]^{-1} \quad (11)$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{k+1|k} = \Phi_{k+1,k} \bar{\mathbf{P}}_{k|k} \Phi_{k+1,k}^T \quad (12)$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{k+1|k+1} = (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{K}}_{k+1} \Psi_{k+1,k+1}) \bar{\mathbf{P}}_{k+1|k} \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_{k+1}(\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}) = \varphi_{k+1}(\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}) \hat{\theta}_{k+1}(\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}) \quad (14)$$

$$\Psi_{k+1,k+1} = \left. \frac{\partial \hat{\mathbf{y}}_{k+1}(\mathbf{X}_{k+1})}{\partial \mathbf{X}_{k+1}} \right|_{\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_{k+1}(\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k})} \quad (15)$$

$$\Phi_{k+1,k} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & (\Delta t) \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} (0.5 - \tilde{\beta})(\Delta t)^2 \mathbf{I} \\ (1 - \tilde{\gamma})(\Delta t) \mathbf{I} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \tilde{\beta}(\Delta t)^2 \mathbf{I} \\ \tilde{\gamma}(\Delta t) \mathbf{I} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

其中: Δt 为采样间隔; $\tilde{\beta}, \tilde{\gamma}$ 为Newmark- β 方法中的参数(这里取 $\tilde{\beta} = 0.25, \tilde{\gamma} = 0.5$)。

将式(9)~式(13)得到的估计 $\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1}$ 代替式(5)~式(7)中的 \mathbf{X}_{k+1} ,就可以计算未知的参数向量 $\hat{\theta}_{k+1}$,关于 $\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1}$ 的推导过程可参见文献[9]。

2 橡胶隔震层迟滞模型

为了准确描述橡胶隔震层的迟滞非线性动力学特性,反映橡胶隔震结构在地震作用下的结构动力学响应,必须对橡胶隔震层进行动力学建模。在文献中提出的各种迟滞模型中,Bouc-Wen模型含有数量适中且具有可调节模型参数,其恢复力-位移曲线光滑连续,因此笔者采用Bouc-Wen模型建立橡胶隔震层迟滞模型。

在基础加速度 $\ddot{x}_0(t)$ 的激励下,橡胶隔震层的运动方程可写为

$$m\ddot{x}(t) + r(x, \dot{x}) = -m\ddot{x}_0(t) \quad (18)$$

其中: m 为隔震层质量; x 为相对位移; \ddot{x} 为结构相

对加速度响应。

系统总恢复力 $r(x, \dot{x})$ 采用 Bouc-Wen 迟滞模型可表示为

$$\dot{r} = c\ddot{x} + k\dot{x} - \beta|\dot{x}| |r|^{n-1}r - \gamma\dot{x}|r|^n \quad (19)$$

其中: k 为隔震层水平刚度; c 为结构阻尼; k 为结构刚度; β, γ, n 为迟滞模型参数。

根据已有的研究成果^[5-6], 橡胶隔震支座可以采用以下参考值: $\beta=0.5, \gamma=0.5, n=2$ 。

3 实验模型和装置

实验模型为一单层剪切型框架结构安装在橡胶隔震支座构成的隔震层质量块上, 并安装配重, 如图1所示。在实验中同样采用两种不同的地震波(EI Centro 和 Kobe 地震波), 利用激振器在滑轨式振动台上模拟基础激励。在上部框架结构、隔震层及基础上分别安装加速度传感器和位移传感器测量系统的加速度和位移信号, 其中位移信号用来和 ASNLSE 方法识别得到的上部结构及隔震层位移进行对比, 判断 ASNLSE 方法用于橡胶隔震结构参数识别和损伤追踪的可行性和准确性。实验中所有信号的采样频率均为 500 Hz。

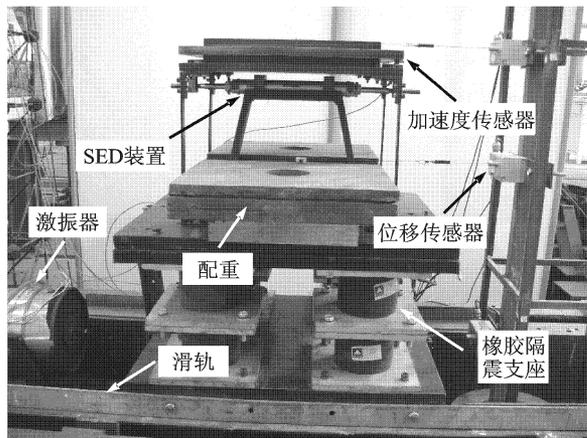


图1 实验装置图

为实现结构在振动过程中的损伤模拟, 使用一套由本课题组提出的在线损伤模拟刚度元件装置(stiffness element device, 简称 SED), 该装置由气缸和支架系统组成, 其提供的有效刚度可用 k_h 来表示^[11]。将该 SED 装置安装在隔震结构上可以模拟实验模型的结构刚度下降, 如图1所示, 该 SED 装置中支架系统被固定在隔震层质量块上, 气缸的活塞与上部结构质量块相连。实验时先向气缸内充入压缩气体, 关闭阀门, 在结构振动过程中通过同时打开气缸活塞两侧的阀门排除压缩气体, 达到在线降低上

部结构刚度的目的。实验前测量了实验模型小振幅的频率, 其第1阶频率为 1.955 Hz, 第2阶频率为 5.376 Hz, 将模型视为剪切梁模型, 根据有限元法得到模型的上部结构刚度为 46.0 kN/m, 隔震层刚度为 52.0 kN/m。这组有限元值在此研究中将作为参考值, 与自适应追踪方法识别得到的橡胶隔震结构各层刚度值作对比, 评价本研究方法识别结果的有效性和准确性。

4 实验结果

在地震波基础激励下, 实验橡胶隔震结构的运动方程为

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 + r_1 - r_2 = -m_1\ddot{x}_0 \\ m_2\ddot{x}_2 + r_2 = -m_2\ddot{x}_0 \\ \dot{r}_1 = \dot{x}_1 - \beta|\dot{x}_1| |r_1| r_1 - \gamma\dot{x}_1 |r_1|^n \\ \dot{r}_2 = c_2(\ddot{x}_2 - \ddot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) \end{cases} \quad (20)$$

其中: $m_1=300$ kg, $m_2=49$ kg 分别为隔震层质量和上部结构质量; c_1 和 c_2 分别为隔震层阻尼和上部结构阻尼; k_1 和 k_2 分别为隔震层等效刚度和上部结构等效刚度; β, γ, n 为隔震层 Bouc-Wen 迟滞模型参数, 在本研究中取值分别为 $\beta=0.5, \gamma=0.5, n=2$; \ddot{x}_0 为基础激励加速度; \ddot{x}_1 和 \ddot{x}_2 分别为隔震层和上部结构的相对加速度; 隔震结构未知结构参数向量为 $\theta = [c_1, c_2, k_1, k_2]^T$ 。

基于三阶有限差分方法^[7], 定义系统输出为 $y_k = [y_{1,k}, y_{2,k}]^T$, 其中

$$y_{i,k} = 5\dot{r}_{i,k} + 8\dot{r}_{i,k-1} - \dot{r}_{i,k-2} \quad (21)$$

实验过程中考虑以下情况: a. 结构受 EI Centro 地震波激励, 上部结构 SED 装置中的气缸内充入 0.75 MPa 的空气, 提供的有效刚度约为 7.5 kN/m, 在实验过程中结构振动到 $t=14$ s 时, 同时打开气缸活塞两侧的阀门排出压缩空气, 模拟上部结构刚度突然降低, 有效刚度从 53.5 kN/m 降低到 46.0 kN/m, 隔震层刚度保持不变, 为 52.0 kN/m; b. 结构受 Kobe 地震波激励, 上部结构 SED 装置中的气缸内充入 0.7 MPa 的空气, 提供的有效刚度约为 7.0 kN/m, 在实验过程中结构振动到 $t=6$ s 时, 同时打开气缸活塞两侧的阀门, 排出压缩空气, 模拟上部结构刚度的突然降低, 有效刚度从 53.0 kN/m 降低到 46.0 kN/m, 隔震层刚度保持不变, 为 52.0 kN/m。

4.1 EI Centro 地震波激励

在本次实验中采用 EI Centro 地震波对隔震结构实验模型施加基础激励, 测得基础加速度 a_d 和隔

震层质量块加速度响应 a_1 以及上部结构加速度 a_2 , 如图2所示。待定参数的初始值分别为 $c_{1,0}=c_{2,0}=0.1 \text{ kN} \cdot \text{s}/\text{m}$, $k_{1,0}=k_{2,0}=40 \text{ kN}/\text{m}$, 相对位移和相对速度的初始值皆为0, 即 $x_{1,0}=x_{2,0}=0, \dot{x}_{1,0}=\dot{x}_{2,0}=0$, 参数向量和状态向量误差协方差矩阵的初值分别为 $P_0=10^3 I_4$ 和 $\bar{P}_{0|0}=I_4, I_j$ 为单位矩阵 ($j \times j$)。

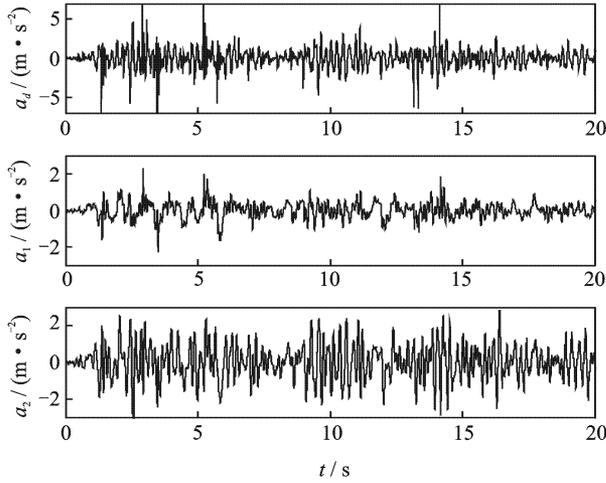


图2 El Centro 地震波激励加速度及响应加速度

基于本研究方法提出的自适应序贯非线性最小二乘方法和实验测得的加速度信号,对实验的橡胶隔震结构进行在线参数识别和损伤追踪,在线识别隔震结构的参数,并追踪上部结构的刚度变化。隔震结构各参数识别结果如图3所示,识别得到的隔震结构各层位移(包括相对位移 x_i 和绝对位移 $d_i, i=1,2$)如图4所示。可以看出,在El Centro 地震波激励下,ASNLSE方法识别得到的隔震结构的刚度参数值与有限元分析结果一致,且准确追踪上部结构刚度的变化。图4为ASNLSE方法识别得到的位移(包括相对位移 x_i 和绝对位移 $d_i, i=1,2$)和实测位移吻合良好。

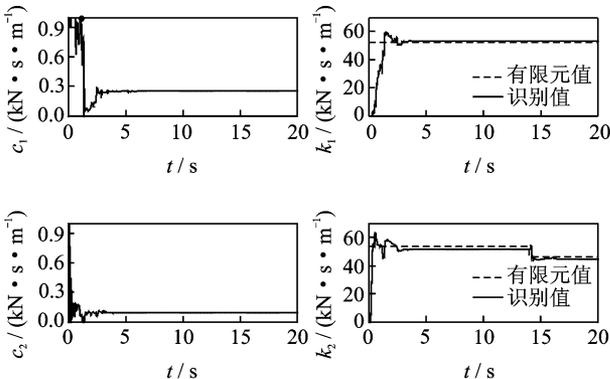


图3 El Centro 地震波激励下橡胶隔震结构参数识别

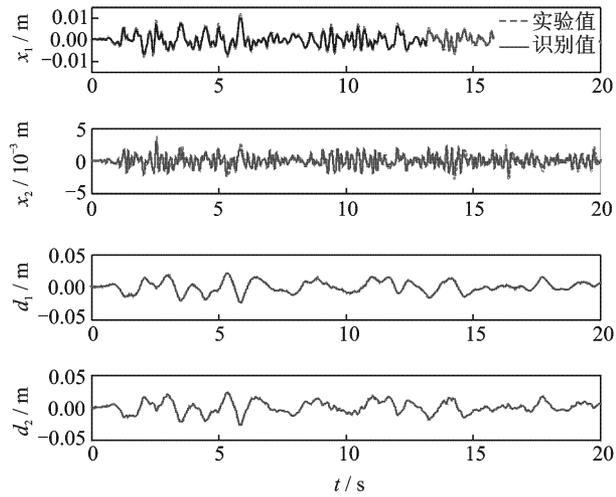


图4 El Centro 地震波激励下橡胶隔震结构各层位移识别结果

4.2 Kobe 地震波激励

本次实验采用Kobe地震波对隔震结构实验模型施加基础激励,测得基础加速度 a_d 、隔震层质量块加速度响应 a_1 以及上部结构加速度 a_2 , 如图5所示。待定参数的初始值分别为 $c_{1,0}=c_{2,0}=0.1/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$, $k_{1,0}=k_{2,0}=40 \text{ kN}/\text{m}$, 相对位移和相对速度的初始值皆为0, 即 $x_{1,0}=x_{2,0}=0, \dot{x}_{1,0}=\dot{x}_{2,0}=0$, 参数向量和状态向量误差协方差矩阵的初值分别为 $P_0=10^3 I_4$ 和 $\bar{P}_{0|0}=I_4$ 。

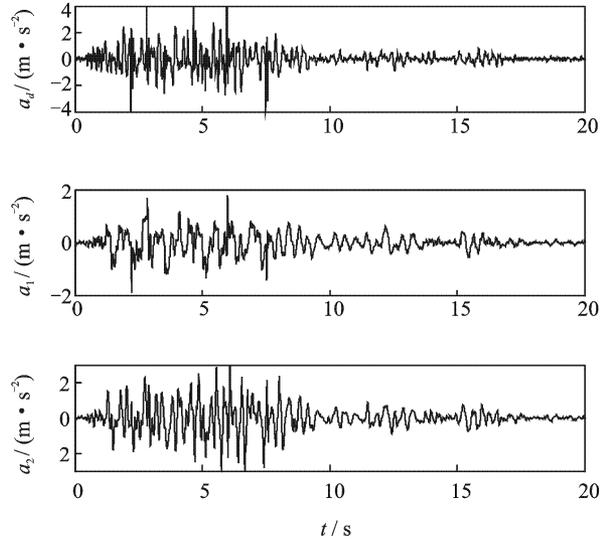


图5 Kobe 地震波激励加速度及响应加速度

基于本研究方法提出的自适应序贯非线性最小二乘方法和实验测得的加速度信号,在线识别隔震结构的参数,并追踪上部结构的刚度变化。隔震结构各参数识别结果如图6所示,识别得到隔震结构各

层位移(包括相对位移 x_i 和绝对位移 $d_i, i=1,2$)如图7所示。可以看出,在 Kobe 地震波激励下,ASNLSE 方法识别得到的隔震结构的刚度参数值与有限元分析结果一致,且准确追踪上部结构刚度的变化。图7显示 ASNLSE 方法识别得到的位移和实测位移吻合良好。

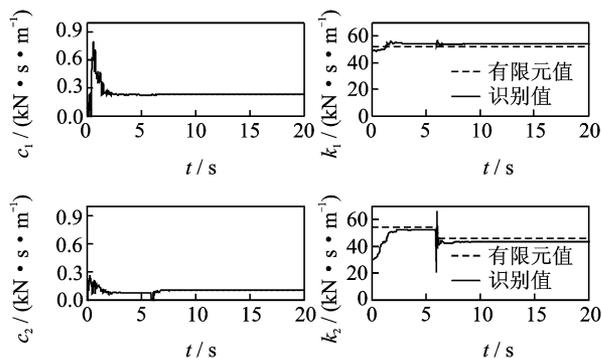


图6 Kobe 地震波激励下橡胶隔震结构参数识别

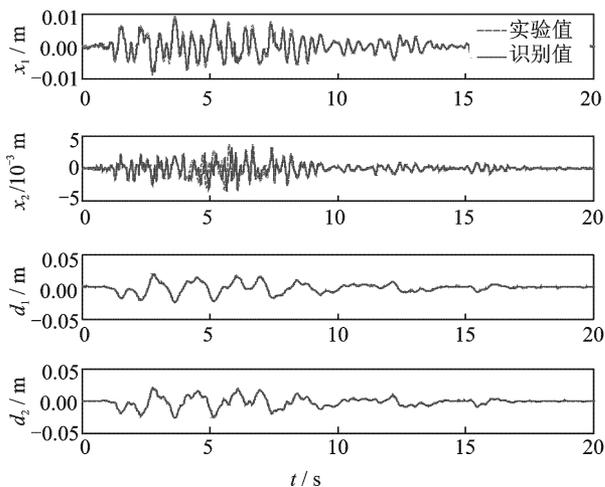


图7 Kobe 地震波激励下橡胶隔震结构各层位移识别

5 结论

1) ASNLSE 方法能准确识别隔震结构的参数及其变化,追踪结构的损伤,识别得到的隔震结构刚度值与有限元值接近,其中,误差由结构模型的不精确引起,证明了该方法在橡胶隔震结构参数识别和损伤诊断中的有效性和准确性。

2) 在不同地震波基础激励下,ASNLSE 方法识别出的隔震结构各层刚度值和阻尼值一致,且识别出的位移响应与实验实测的位移曲线吻合良好,证明了该方法能有效、准确地识别橡胶隔震支座的结构参数,且只需测量结构加速度响应和基础激励加速度信号就能够识别出系统的所有参数,在实际应

用中易于实现,尤其是在橡胶隔震结构参数识别和损伤诊断方面有良好的应用前景。

致谢 本研究实验用橡胶隔震支座由衡水震泰隔震器材有限公司提供,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Skinner R I, Robinson W H, McVerry G H. 工程隔震概论[M]. 谢礼立,周雍年,赵兴权,译. 北京:地震出版社,1996:1-12.
- [2] Narasimhan S, Nagarajaiah S, Gavin H, et al. Smart base isolated benchmark building part I: problem definition[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2006,13(2-3): 573-588.
- [3] Tan R Y, Huang M C. System identification of a bridge with lead-rubber bearings[J]. Computers and Structures, 2000,74:267-280.
- [4] Furukawa T, Ito M, Noori M N. System identification of base-isolated building using seismic response data[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005,131(3):268-273.
- [5] 尹强,周丽,汪新明. SNLSE 方法在橡胶隔震支座参数估计中的应用研究[J]. 振动与冲击,2010,29(8):155-159.
Yin Qiang, Zhou Li, Wang Xinming. Application study on parametric estimation of rubber bearings using SNLSE approach [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(8):155-159. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] Yang N J, Lin S. Identification of parametric variations of structures based on Least Square estimation and adaptive tracking technique[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005,131(3):290-298.
- [8] 尹强,周丽. 基于遗传优化最小二乘算法的结构损伤识别[J]. 振动与冲击,2010,29(8):73-77.
Yin Qiang, Zhou Li. Structural damage identification based on GA optimized least square estimation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(8):73-77. (in Chinese)
- [9] Yang N J, Huang Hongwei, Lin S. Sequential nonlinear least-square estimation for damage identification of structures[J]. International Journal of Non-linear Mechanics, 2006,41(1):124-140.
- [10] Li S J, Suzuki Y, Noor M. Improvement of parameter estimation for non-linear hysteretic systems with

slip by a fast Bayesian bootstrap filter[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2004,39(9): 1435-1445.

- [11] 吴新亚,周丽,尹强,等.基于自适应卡尔曼滤波方法的结构损伤识别实验研究[J].振动工程学报,2008,21(2):197-202.

Wu Xinya, Zhou Li, Yin Qiang, et al. Experimental study of an adaptive extended Kalman filter for structural damage identification[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008,21(2):197-202. (in Chinese)

- [12] Zhou Li, Wu Shinya, Yang N J. Experimental study of an adaptive extended Kalman filter for structural damage identification[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2008,14(1):42-51.

- [13] Sato T, Chung M. Structural identification using adaptive Monte Carlo filter[J]. Journal of Structural Engineering, 2005,51(A):471-477.

- [14] 唐和生,张伟,陈镛,等.基于自适应粒子滤波的结构损伤识别[J].振动、测试与诊断,2008,28(3):211-215.

Tang Hesheng, Zhang Wei, Chen Rong, et al. Structural damage identification method based on adaptive particle filtering[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2008,28(3):211-215. (in Chinese)

- [15] Yang N J, Huang Hongwei, Pan S. Adaptive quadratic sum-squares error for structural damage identification[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(2):67-77.

- [16] 尹强,周丽.基于模型参考自适应算法的非线性结构损伤识别[J].振动工程学报,2006,19(3):341-345.

Yin Qiang, Zhou Li. Nonlinear structural identification using a recursive model reference adaptive algorithm[J]. Journal of Vibration Engineering, 2006,19(3):341-345. (in Chinese)

- [17] 浩祥,闫维明,张爱林,等.基于支持向量机的张弦梁损伤识别试验[J].振动、测试与诊断,2011,31(1):45-49.

He Haoxiang, Yan Weiming, Zhang Ailin, et al. Damage detection experiment on beam string structure using support vector machine[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011,31(1):45-49. (in Chinese)



第一作者简介:尹强,男,1980年12月生,博士、讲师。主要研究方向为结构健康监测、结构损伤识别及动态信号分析与故障诊断。曾发表《Parameter identification of hysteretic rubber-bearing based on sequential nonlinear least-square estimation》(《Earthquake Engineering and Engineering Vibration》2010,Vol. 9, No. 3)等论文。

E-mail:yinqiang@njust.edu.cn