

基于 QSSE 方法的橡胶隔震支座参数识别

穆腾飞 周丽

(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:采用二次误差平方和(Quadratic sum-squares error, QSSE)方法对橡胶隔震支座参数识别进行研究。建立经典Bouc-Wen模型以模拟橡胶隔震支座的非线性动力学特性。对橡胶隔震支座进行振动台实验,基于实验测量的加速度响应和QSSE方法在线实时地识别橡胶隔震支座的参数和位移。研究表明,在两种典型地震波的激励作用下,采用QSSE方法分别对3种参数数量不同的Bouc-Wen模型进行识别,得到的橡胶隔震支座模型参数一致,且识别位移曲线和实际测量位移曲线吻合良好,验证了QSSE方法在橡胶隔震支座参数识别中的有效性与准确性,并证明了本文所得Bouc-Wen模型参数的合理性及Bouc-Wen模型简化的可行性。

关键词:结构健康监测;参数识别;二次误差平方和方法;橡胶隔震支座;Bouc-Wen模型

中图分类号:TU352.1;N945.14;O327;TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2012)02-0204-07

Parameter Identification of Rubber-Bearings Based on QSSE Method

Mu Tengfei, Zhou Li

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Parameter identification of nonlinear rubber-bearing isolators is investigated using quadratic sum-squares error (QSSE) method. Classic Bouc-Wen models are established to describe the dynamic character of the rubber-bearings. Further, experimental tests using a particular type of rubber-bearing are conducted. Based on experimental data, QSSE method is used to identify model parameters. The results show that the estimated parameters obtained by QSSE method are identical in different scenarios (i. e., different excitations and Bouc-Wen models with different amount of parameters). Besides, the identified displacements match the experimental ones well. Research results demonstrate that QSSE method is effective and accurate for parameter identification of nonlinear hysteretic rubber-bearings. Bouc-Wen model has the ability to describe the nonlinear behavior of rubber-bearings, and the model simplifying is reasonable.

Key words: structure health monitoring; parameter identification; quadratic sum-squares error(QSSE) method; rubber-bearing; Bouc-Wen model

基础隔震技术是近年来国内外应用最广泛的工程抗震新技术,它能有效地减小或避免地震等灾害对建筑的损伤^[1-2]。该技术的核心部件——橡胶隔震支座,其安全状况关系到整个结构的抗震性

能、使用寿命等重要因素,因此,迫切需要更实用的橡胶隔震支座健康监测技术。

为了实现橡胶隔震支座的健康监测,首先要为橡胶隔震支座建立合适的迟滞模型。国内外学者提

基金项目:国家自然科学基金(11172128)资助项目;国家自然科学基金国际(地区)合作与交流(61161120323)资助项目;江苏省“六大人才高峰”(2010-JZ-004)资助项目;江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX11-0171)资助项目。

收稿日期:2011-06-09;**修订日期:**2012-01-09

通讯作者:周丽,女,教授,博士生导师,1963年4月生,E-mail:lzhou@nuaa.edu.cn。

出了双线性模型、三线性模型、MSS模型及Bouc-Wen模型等^[3-4]。其中,经典Bouc-Wen模型由于具有更多可调参数而得到广泛应用。

此外,参数识别是橡胶隔震支座健康监测系统的重要组成部分。近年来,基于结构振动数据的系统辨识和损伤识别方法已经受到了广泛关注,如最小二乘法(Least-square estimation, LSE)^[5-6]、广义卡尔曼滤波法(Extended Kalman filter, EKF)^[7-8]、 H_∞ 滤波法^[9]和蒙特卡罗滤波法^[10]等。这些方法可在没有精确模态参数的情况下识别连续系统参数。然而, LSE方法中需要的速度和位移信息通常由加速度数据积分获得,会导致数据漂移。当结构发生损伤时,这种影响会更大,且很难在线消除。在EKF方法中,当获得的数据不完备时, EKF方法会变得不稳定,且会因初始参数设置不合理而造成发散。此外,上述方法还面临计算量大、抗噪声能力差等问题,在实际工程应用中受到一定限制。为消除这些不足,近期, Yang等学者提出了二次误差平方和(Quadratic sum-squares error, QSSE)方法^[11]。该方法主要关心系统未知参数 θ (包括结构的刚度、阻尼和非线性参数等)的估计,将状态向量 $\mathbf{X}=[\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}]^T$ 表示为 θ 的隐函数,即 $\mathbf{X}=\mathbf{X}(\theta)$ 。而测量数据与理论响应的误差函数是未知参数 θ 的非线性函数,将该误差函数进行线性化处理,可以得到误差平方和,即目标函数,该目标函数是未知参数向量 θ 的二次函数。然后根据测量值,通过最小化目标函数来推导 θ 的解析递归解。QSSE方法中的解析递归解是无条件稳定和收敛的,且该方法并不需要通过积分得到位移和速度,因此排除了数值漂移的问题。此外, QSSE方法能够显著减少计算量,提高计算效率,并对噪声具有一定的鲁棒性,使得该方法在实际工程应用中更易于实现。

本文采用经典Bouc-Wen模型描述橡胶隔震支座的动力学特性,在已有的研究成果基础上,固定其中某些迟滞参数值,简化模型,快速有效地实现隔震支座参数的识别。本文分别考虑3种迟滞参数数量不同的Bouc-Wen模型,对橡胶隔震支座进行振动台实验,基于测量的加速度信号,采用QSSE方法对这3种模型进行参数识别。实验结果表明,在两种典型地震波激励下,对3种参数数量不同的迟滞模型进行参数识别,所得到的识别值相一致且与文献[12]中的建议值相同,位移识别结果与实验测量值吻合良好,验证了QSSE方法识别橡胶隔震支座参数的有效性及Bouc-Wen模型简化的可行性。

1 橡胶隔震支座迟滞模型

本文采用广泛应用于非线性建模的经典Bouc-Wen模型描述在基础运动下橡胶隔震支座的非线性动力学特性。

在基础加速度激励 $\ddot{x}_0(t)$ 作用下,橡胶隔震支座系统的运动方程可写为

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + R_T(x, z) = -m\ddot{x}_0(t) \quad (1)$$

$$R_T(x, z) = akx + (1 - \alpha)kz \quad (2)$$

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta|\dot{x}||z|^{n-1}\dot{z} - \gamma\dot{x}|z|^n \quad (3)$$

式中: x 为系统的相对位移; z 为系统的迟滞位移; m 为系统质量; c 为系统阻尼系数; $R_T(x, z)$ 为系统的非线性回复力; k 为系统刚度系数, α 为系统线性与非线性刚度的比值; A, β 和 γ 为模型的参数; n 为模型的阶数。

由方程(1~3)可知,经典Bouc-Wen模型包含 $A, \alpha, \beta, \gamma, n$ 五个迟滞参数和 c, k 两个结构参数。通常 A 可以取1^[13],进而橡胶隔震支座模型参数缩减为 $c, k, \alpha, \beta, \gamma, n$ 。根据已有的研究结果,对于天然橡胶支座,可采用以下建议值^[12, 14]: $\beta=0.5, \gamma=0.5, n=2$ 。本文在实验研究中采用QSSE方法对实际测量的信号进行分析,并将得到的参数估计值与上述建议值进行对比验证。

2 QSSE方法

m 自由度非线性系统运动方程可表示为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{F}_c[\dot{\mathbf{x}}(t), \theta] + \mathbf{F}_s[\mathbf{x}(t), \theta] = \eta\mathbf{f}(t) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x}(t)=[x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ 为位移向量; \mathbf{M} 为质量矩阵; $\mathbf{F}_c[\dot{\mathbf{x}}(t), \theta]$ 为阻尼力向量; $\mathbf{F}_s[\mathbf{x}(t), \theta]$ 为刚度力向量; $\mathbf{f}(t)=[f_1(t), f_2(t), \dots, f_s(t)]^T$ 为激励向量; η 为与 $\mathbf{f}(t)$ 相关的激励响应矩阵; $\theta=[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$,为未知参数向量,包括 n 个待辨识的系统未知参数,如刚度、阻尼、非线性参数等。假设未知参数向量 θ 是常量,即 $\theta=\theta_1=\theta_2=\dots=\theta_{k+1}$,其中 $\theta_i=\theta(t=i\Delta t)$, $i=1, 2, \dots, k+1, \Delta t$ 为采样时间间隔。

引入 $2m$ 维状态向量

$$\mathbf{X}(t) = [\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}]^T \quad (5)$$

由式(4, 5)可得状态方程

$$d\mathbf{X}(t)/dt = \mathbf{g}(\mathbf{X}, \theta, \mathbf{f}) + \mathbf{w}(t) \quad (6)$$

式中 $\mathbf{w}(t)$ 为模型噪声向量,其均值为零,协方差矩阵为 $\mathbf{Q}(t)$ 。

系统的离散观测向量(测量输出)可表示为

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{h}[\mathbf{X}_i(\theta_i), \theta_i, \mathbf{f}_i] + \mathbf{v}_i \quad (7)$$

式中: y_i 为 $t=i\Delta t$ 时刻的一个 l 维观测向量; v_i 为测量噪声向量。QSSE 方法通过最小化观测值 y_i 和理论值 h 之间的二次误差平方和以确定未知参数 θ_i 。 $t=(k+1)\Delta t$ 时刻二次误差平方和可表示为

$$J_{k+1} = \sum_{i=1}^{k+1} e_i^T R_i^{-1} e_i \quad (8)$$

$$e_i = y_i - h[X_i(\theta_i), \theta_i, f_i]$$

式中, R_i 为测量噪声向量 v_i 的方差矩阵。由于 $h[X_i(\theta_i), \theta_i, f_i]$ 是关于 θ_i 的高度非线性函数, 需将其在 $t=(i-1)\Delta t$ 时刻线性化, 即

$$h[X_i(\theta_i), \theta_i, f_i] = h(\hat{X}_{i|i-1}, \hat{\theta}_{i-1}, f_i) + H_i(\theta_i - \hat{\theta}_{i-1}) \quad (9)$$

式中

$$H_i = H_{\theta, i} + H_{X, i} X_{\theta, i} \quad (10)$$

$$H_{\theta, i} = \left[\frac{\partial h(X_i, \theta_i, f_i)}{\partial \theta_i} \right]_{X_i=\hat{X}_{i|i-1}, \theta_i=\hat{\theta}_{i-1}} \quad (11)$$

$$H_{X, i} = \left[\frac{\partial h(X_i, \theta_i, f_i)}{\partial X_i} \right]_{X_i=\hat{X}_{i|i-1}, \theta_i=\hat{\theta}_{i-1}} \quad (12)$$

$$X_{\theta, i} = X_{\theta}(\hat{\theta}_{i-1}) = \left[\frac{\partial X_i}{\partial \theta_i} \right]_{\theta_i=\hat{\theta}_{i-1}} \quad (13)$$

在式(13)中, $X_{\theta}(\theta)$ 为状态向量 X 关于参数向量 θ 的灵敏度矩阵, 即

$$X_{\theta}(\theta) = \frac{\partial X}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} x_{\theta} \\ \dot{x}_{\theta} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其递推过程如下

$$X_{\theta, k+1} = X_{\theta, k} + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} \bar{g}(X_{\theta, i|k}, \hat{\theta}_k, F) dt \quad (15)$$

$$\bar{g}(X_{\theta}, \theta, F) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -M^{-1} \frac{\partial F_S}{\partial x} & -M^{-1} \frac{\partial F_C}{\partial \dot{x}} \end{bmatrix} X_{\theta} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ M^{-1} F(x, \dot{x}, \theta) \end{bmatrix} \quad (16)$$

令 $\hat{\theta}_{k+1}$ 为 $t=(k+1)\Delta t$ 时刻 θ_{k+1} 的估计值, 其递推公式表示如下

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + K_{k+1} [y_{k+1} - h(\hat{X}_{k+1|k}, \hat{\theta}_k, f_{k+1})] \quad (17)$$

$$\hat{X}_{k+1|k} = \hat{X}_{k|k} + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} g(\hat{X}_{i|k}, \hat{\theta}_k, f) dt \quad (18)$$

$$K_{k+1} = P_k H_{k+1}^T [H_{k+1} P_k H_{k+1}^T + R_{k+1}]^{-1} \quad (19)$$

$$P_k = [I_n - K_k H_k] P_{k-1} \quad k=1, 2, \dots \quad (20)$$

式中 K_{k+1} 为增益矩阵。在以上推导中, 一旦 $\hat{\theta}_k$ 被估计出来, 状态向量可以很方便地由式(18)计算获得, 同时在估计 $\hat{\theta}_{k+1}$ 时这些状态向量用卡尔曼滤波更新, 即

$$\hat{X}_{k+1|k+1} = \hat{X}_{k+1|k} +$$

$$\bar{K}_{k+1} [y_{k+1} - h(\hat{X}_{k+1|k}, \hat{\theta}_{k+1}, f_{k+1})] \quad (21)$$

式中, 卡尔曼增益矩阵 \bar{K}_{k+1} 为

$$\bar{K}_{k+1} = \bar{P}_{k+1|k} H_{X, k+1}^T [H_{X, k+1} \bar{P}_{k+1|k} H_{X, k+1}^T + R_{k+1}]^{-1} \quad (22)$$

式中, $\bar{P}_{k+1|k}$ 递推过程如下

$$\bar{P}_{k+1|k} = \phi_{k+1, k} \bar{P}_{k|k} \phi_{k+1, k}^T + Q_{k+1} \quad (23)$$

$$\bar{P}_{k|k} = [I_{2m} - \bar{K}_k H_{X, k}] \bar{P}_{k|k-1} \quad (24)$$

以上即为 QSSE 方法的求解过程, 要进行递推求解, 还需要对待定系统参数 θ 以及状态向量 X 赋初始值, 并假设参数向量和状态向量的误差协方差矩阵 $P_0, P_{0|0}$ 以及与测量噪声及模型噪声相关值 R 和 Q 。

3 实验研究

3.1 实验模型和装置

实验模型为由 8 个 GZNΦ110 型天然橡胶隔震支座支撑质量块所组成的结构, 质量块质量 $m=115 \text{ kg}$, 实验装置如图 1 所示。在实验中分别采用 El Centro 和 Kobe 两种地震波, 利用激振器和滑轨振动台模拟基础激励, 在隔震支座上部质量块及基础上安装 PCB 3701G3FA3G 型加速度传感器和 ASM WS10-250-10V-L10 型位移传感器, 通过加拿大 Quanser 公司 Q8 控制板实现信号采集, 测量系统的加速度响应和位移响应, 其中位移响应用来验证模型的合理性及 QSSE 方法用于橡胶隔震支座参数识别的有效性和准确性。实验中所有信号的采样频率均为 500 Hz。

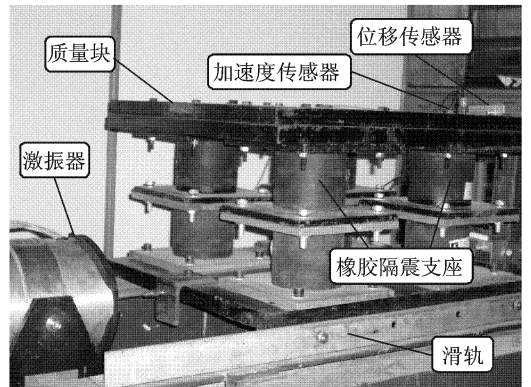


图 1 实验装置图

3.2 实验结果

本实验分别对模型基础施加 El Centro 地震波和 Kobe 地震波激励, 测得的基础加速度响应 a_d 和结构加速度响应 a_1 分别如图 2, 3 所示。

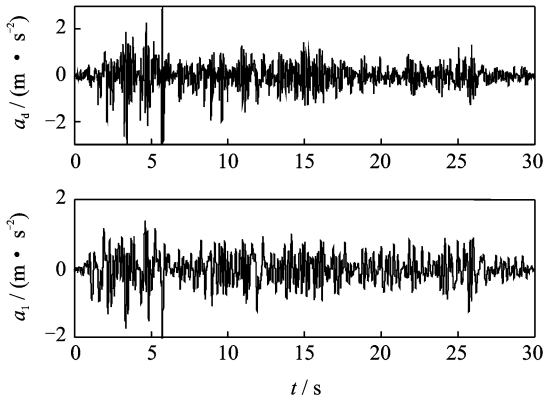


图2 El Centro地震波激励加速度及响应加速度

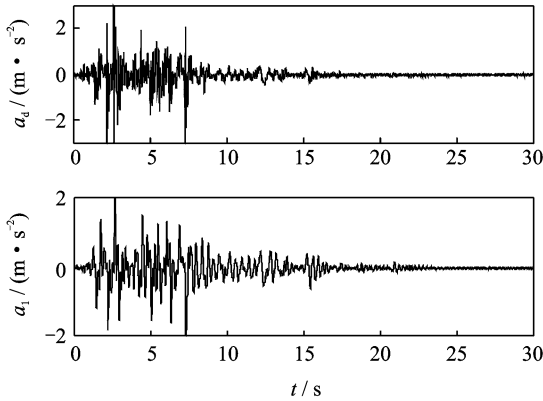
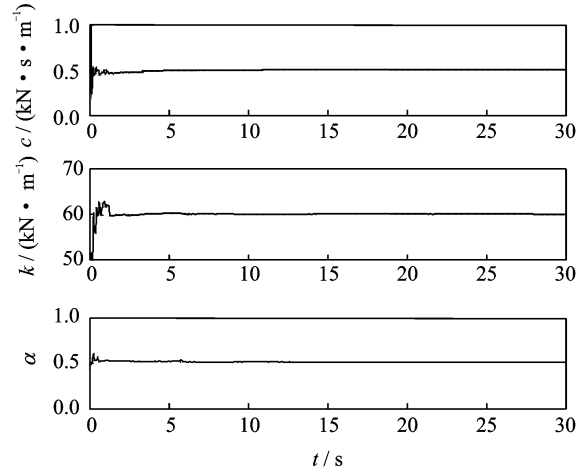
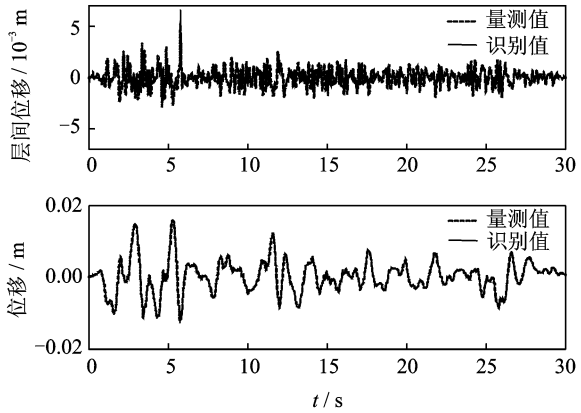


图3 Kobe地震波激励加速度及响应加速度



(a) El Centro地震波作用下参数识别结果



(b) El Centro地震波作用下位移识别结果

基于经典Bouc-Wen模型,根据已有的研究结果,在 A 取1时,分别考虑3种参数数量不同的Bouc-Wen模型,通过QSSE方法对实际测量的信号进行分析。

3.2.1 模型1

为了快速有效地识别橡胶隔震支座参数,将方程(3)中 β, γ, n 取学者建议值: $\beta=0.5, \gamma=0.5, n=2$,保留 α 一个迟滞参数,则橡胶隔震支座迟滞模型的待识别值 $\theta=[c \ k \ \alpha]^T$ 。在QSSE估计算法中,选取待定参数 c, k 和 α 的初值分别为 $c_0=0.5 \text{ kN} \cdot \text{s}/\text{m}, k_0=50 \text{ kN}/\text{m}, \alpha_0=0.5$,位移初值 $x_0=0$,速度初值 $\dot{x}_0=0$,迟滞位移初值 $z_0=0$ 。设置参数向量和状态向量的误差协方差矩阵分别为 $P_0=10^5 I_3, P_{010}=I_3$,测量噪声方差矩阵 $R=1.5$ 以及系统噪声协方差矩阵 $Q=10^{-5} I_3$,式中的 I_i 为 $i \times i$ 阶单位矩阵。

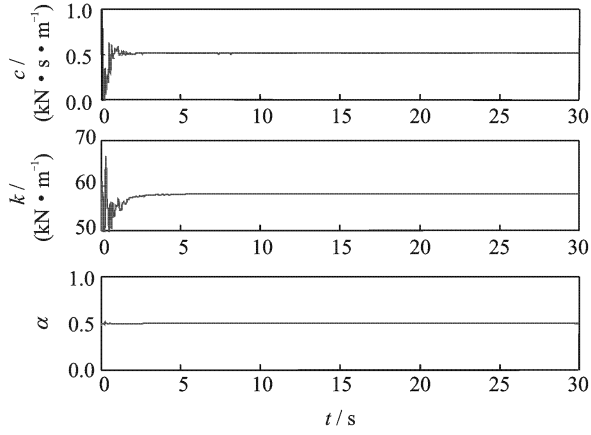
分别在El Centro地震波和Kobe地震波激励下,采用QSSE方法对一迟滞参数Bouc-Wen模型进行参数识别,识别结果分别如图4,5所示。从图4(a)和图5(a)中可以看出,在两种典型的地震波激励下,采用QSSE方法识别出的迟滞模型参数值一

致,且收敛速度较快。由图4(b)和图5(b)可以看出,该情况下识别得到的位移和实际测量的位移吻合良好。

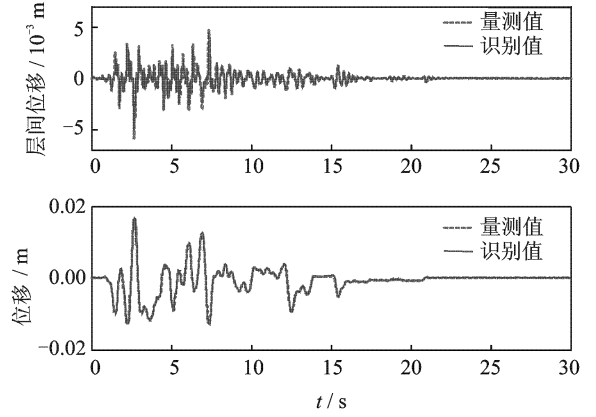
3.2.2 模型2

为了更精确地描述橡胶隔震支座力学性能,将方程(3)中 n 取学者建议值: $n=2$,保留 α, β, γ 三个迟滞参数,则橡胶隔震支座迟滞模型的待识别值 $\theta=[c \ k \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T$ 。在QSSE估计算法中,选取参数初值: $c_0=0.5 \text{ kN} \cdot \text{s}/\text{m}, k_0=50 \text{ kN}/\text{m}, \alpha_0=0.5, \beta_0=0.5, \gamma_0=0.5$;状态参数初值: $x_0=0, \dot{x}_0=0, z_0=0$ 。设置算法相关量: $P_0=10^5 I_5, P_{010}=I_3, R=1, Q=10^{-5} I_3$ 。

分别在El Centro地震波和Kobe地震波激励下,采用QSSE方法对三迟滞参数Bouc-Wen模型进行参数识别,识别结果分别如图6,7所示。从图6(a)和图7(a)中可以看出,在两种典型的地震波激励下,采用QSSE方法识别出的迟滞模型参数相同,且与已有研究结果给出的建议值及模型1中的

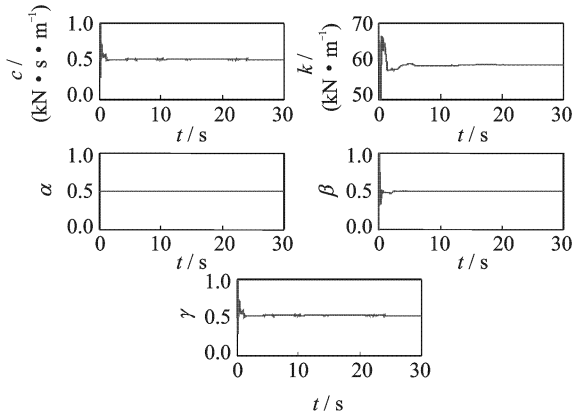


(a) Kobe地震波作用下参数识别结果

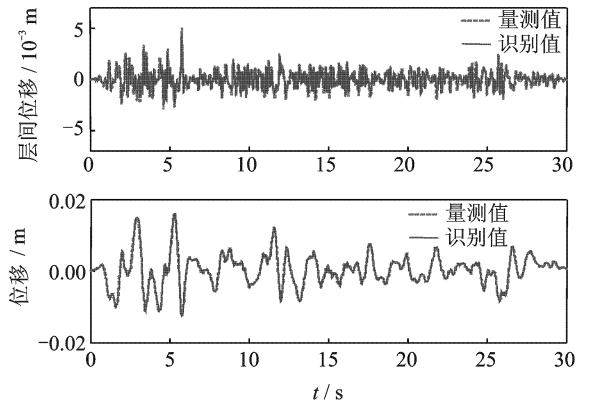


(b) Kobe地震波作用下位移识别结果

图5 Kobe地震波激励下橡胶隔震支座识别结果

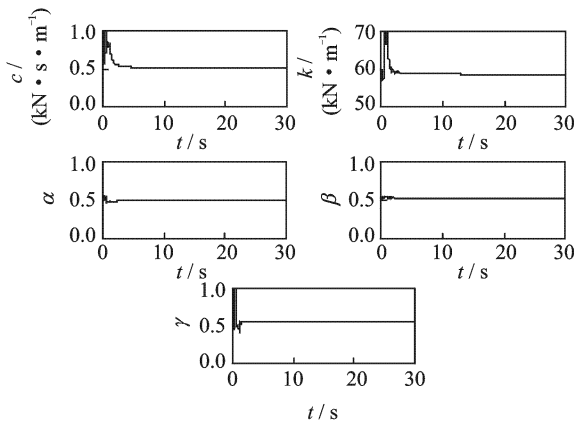


(a) El Centro地震波作用下参数识别结果

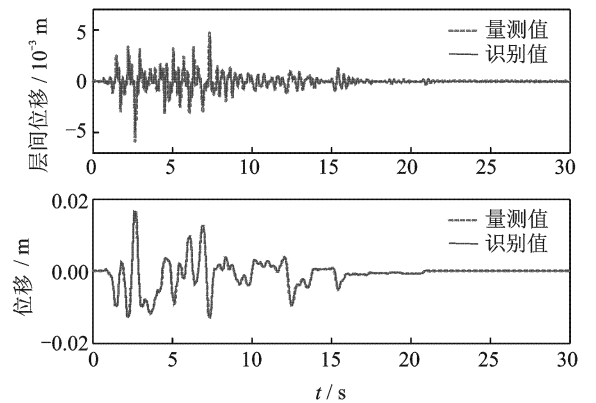


(b) El Centro地震波作用下位移识别结果

图6 El Centro地震波激励下橡胶隔震支座识别结果



(a) Kobe地震波作用下参数识别结果



(b) Kobe地震波作用下位移识别结果

图7 Kobe地震波激励下橡胶隔震支座识别结果

识别结果一致。由图6(b)和图7(b)可以看出,该情况下识别得到的位移和实际测量的位移吻合良好。

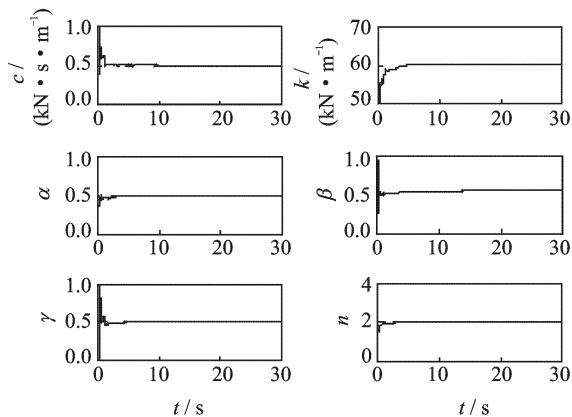
3.2.3 模型3

为了进一步研究 QSSE 算法识别橡胶隔震支

座参数的有效性,保留 α, β, γ, n 四个迟滞参数,则橡胶隔震支座迟滞模型的待识别值 $\theta = [c \ k \ \alpha \ \beta \ \gamma \ n]^T$ 。在 QSSE 估计算法中,选取参数初值: $c_0 = 0.5 \text{ kN} \cdot \text{s}/\text{m}$, $k_0 = 50 \text{ kN}/\text{m}$, $\alpha_0 = 0.5$, $\beta_0 = 0.5$, $\gamma_0 =$

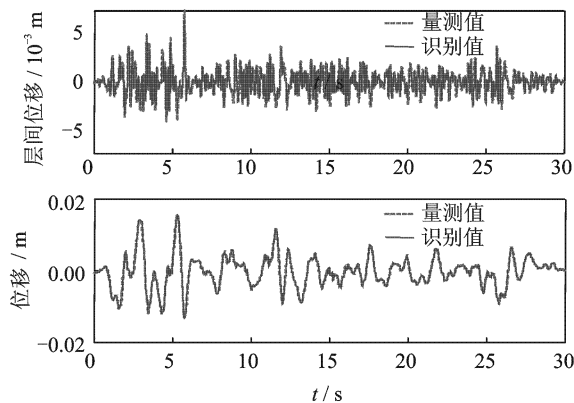
0.5, $n=3$; 状态参数初值: $x_0=0, \dot{x}_0=0, z_0=0$ 。设置算法相关量: $P_0=10^6 I_6, R=10, Q=10^{-5} I_3$ 。

分别在 El Centro 地震波和 Kobe 地震波激励下,采用 QSSE 方法对四迟滞参数 Bouc-Wen 模型进行参数识别,识别结果如图 8,9 所示。从图 8(a)



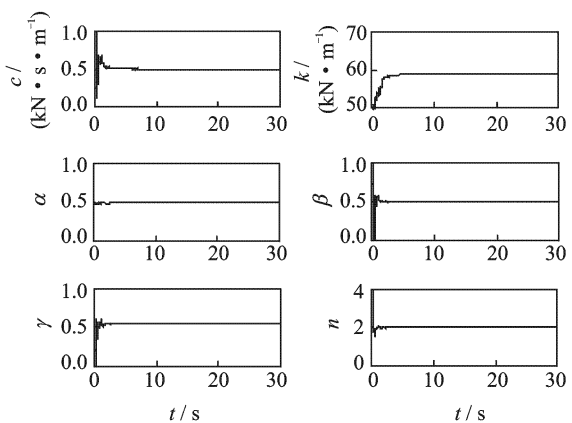
(a) El Centro地震波作用下参数识别结果

和图 9(a)中可以看出,在两种典型的地震波激励下,采用 QSSE 方法识别出的迟滞模型参数相同,且与已有研究结果给出的建议值及模型 1,2 中的识别结果一致。由图 8(b)和图 9(b)可以看出,识别得到的位移和实际测量的位移吻合良好。

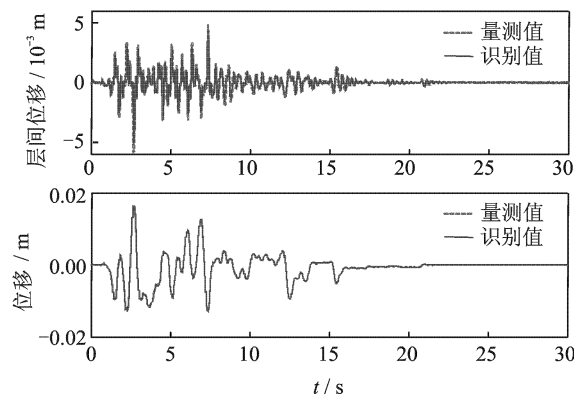


(b) El Centro地震波作用下位移识别结果

图 8 El Centro 地震波激励下橡胶隔震支座识别结果



(a) Kobe地震波作用下参数识别结果



(b) Kobe地震波作用下位移识别结果

图 9 Kobe 地震波激励下橡胶隔震支座识别结果

4 结 论

本文建立 3 种参数数量不同的 Bouc-Wen 模型以模拟橡胶隔震支座的动力学特性。使用两种典型的地震波激励,对橡胶隔震支座进行振动台实验。基于实验测得的加速度响应,采用 QSSE 方法对橡胶隔震支座迟滞非线性模型的参数进行在线识别,并将识别得到的位移与实际测量得到的位移进行对比。研究表明:

(1)在两种典型的地震波激励下,采用 QSSE 方法对橡胶隔震支座模型进行在线参数识别,所得到的识别值一致,且识别出的位移与实验测得的位

移吻合良好,两者之间较小的误差主要是由于测量噪声引起,证明了该方法在橡胶隔震支座参数识别中的有效性与准确性。

(2)对参数数量不同的橡胶隔震支座模型, QSSE 方法识别出的模型参数一致,并与文献[12]中给出的建议值基本相同,表明了识别出的 Bouc-Wen 模型参数能有效地描述橡胶隔震支座的非线性特性,证明了该迟滞模型简化的可行性。

(3)QSSE 方法只需测量振动加速度响应,就能实时有效地识别出系统的所有参数,并能够在线消除数据漂移,此外,其解析递归解是无条件稳定和收敛的,使得该方法具有较强的实用性,在橡胶

隔震支座等工程结构健康监测方面具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Buckle I G, Nagarajaiah S, Ferrell K. Stability of elastomeric isolation bearings; experimental study [J]. ASCE, Journal of Structural Engineering, 2002, 128(1): 3-11.
- [2] Narasimhan S, Nagarajaiah S, Gavin H, et al. Smart base isolated benchmark building. Part I: Problem definition[J]. Journal of Structural Control and Health Monitoring, 2006, 13(2/3): 573-588.
- [3] Furukawa T, Ito M, Izawa K, et al. System identification of base-isolation building using seismic response[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2005, 131(3): 268-275.
- [4] Ismail M, Ikhrouane F, Rodellar J. The hysteresis Bouc-Wen model: a survey[J]. Archives of Computational Methods In Engineering, 2009, 16(2): 161-188.
- [5] Lin J W, Betti R, Smyth A W, et al. On-line identification of nonlinear hysteretic structural systems using a variable trace approach[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001, 30(9): 1279-1303.
- [6] Yang J N, Lin S. Identification of parametric variations of structures based on least square estimation and adaptive tracking technique[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(3): 290-298.
- [7] Maruyama O, Hoshiya M. System identification of an experimental model by extended Kalman filter [C]//Proceedings of Structural Safety and Reliability, ICOSSA 2001. Lisse: Swets & Zeitinger, 2002.
- [8] Zhou L, Wu S Y, Yang J N. Experimental study of an adaptive extended Kalman filter for structural damage identification[J]. Journal of Infrastructure Systems, ASCE, 2008, 14(1): 42-51.
- [9] Sato T, Qi K. Adaptive H_{∞} filter; its application to structural identification[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(11): 1233-1240.
- [10] Sato T, Chung M. Structural identification using adaptive Monte Carlo filter[J]. JSCE Journal of Structural Engineering, 2005, 51(A): 471-477.
- [11] Yang J N, Huang H, Pan S. Adaptive quadratic sum-squares error for structural damage identification [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(2): 67-77.
- [12] Yin Q, Zhou L, Wang X M. Parameter identification of hysteretic rubber-bearing based on sequential nonlinear least-square estimation [J]. Journal of Earthquake Engineering & Engineering Vibration, 2010, 9(3): 375-383.
- [13] Ma F, Zhang H, Bockstedte A, et al. Parameter analysis of the differential model of hysteresis[J]. Journal of Applied Mechanics, 2004, 71(3): 342-349.
- [14] 黄建文, 赵斌. 叠层橡胶支座基础隔震建筑的非线性时程分析[J]. 西安科技学院学报, 2000, 20(4): 317-321.
Huang Jianwen, Zhao Bin. The nonlinear dynamic response of multistory base isolated building with laminated rubber bearings[J]. Journal of Xi'an University of Science & Technology, 2000, 20(4): 317-321.