

# 基于EKF方法的橡胶隔震支座参数识别实验研究

尹强 周丽

(南京航空航天大学机械结构力学与控制国家重点实验室,南京,210016)

**摘要:**采用Bouc-Wen模型建立橡胶隔震支座的非线性动力学方程,基于已有研究成果,缩减模型参数简化模型,建立不同数量参数的迟滞模型模拟橡胶隔震支座的非线性特性。对橡胶隔震支座进行振动台实验,基于测得的加速度信号和广义卡尔曼滤波(Extended Kalman filter, EKF)方法在线识别橡胶隔震支座的参数和位移。对不同参数数量的Bouc-Wen模型在不同地震波激励下,EKF方法识别得到的橡胶隔震支座模型参数一致,且识别的位移和实际测量得到的位移曲线吻合良好,验证了本文所得模型参数的有效性和准确性及模型简化的合理性,也证明了EKF方法在橡胶隔震支座参数识别中的有效性。

**关键词:**橡胶隔震支座;迟滞模型;参数估计;Bouc-Wen模型;广义卡尔曼滤波

**中图分类号:**N945.14;O327;TP391.9

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-2615(2012)01-0043-07

## Experimental Study on Parameter Identification of Non-Linear Hysteretic Rubber-Bearing Isolators Using EKF Method

*Yin Qiang, Zhou Li*

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

**Abstract:** The Bouc-Wen model is investigated to represent the hysteretic behavior of rubber-bearing isolators. The model is simplified by reducing the hysteretic parameters using the suggested values of other scholars. Three models with different amount of parameters are established to describe the nonlinear character of the rubber-bearing isolators. Further, experimental tests using a particular type of rubber-bearing isolator (GZN110) are conducted. Based on experimental vibration data measured from sensors, the extended Kalman filter (EKF) method is used to identify the model parameters. Different excitation scenarios, i. e., different earthquakes, and the Bouc-Wen models with different amount of parameters are considered. The estimated parameters are identical, and the identified displacements match the experimental ones well under different excitations. Experimental results demonstrate that the Bouc-Wen model is capable of describing the nonlinear behavior of rubber-bearing isolator, the simplifying model is reasonable, and the EKF approach is quite effective for parameter identification of nonlinear hysteretic rubber-bearings.

**Key words:** rubber-bearing isolator; hysteretic model; parameter identification; Bouc-Wen model; extended Kalman filter

**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。

**收稿日期:**2011-01-25;**修订日期:**2011-09-19

**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。

基础隔震技术是一项具有革新意义的设计方法,将地震对建筑物的损伤减小或者予以避免<sup>[1]</sup>。近年来隔震技术在国内外的应用也越来越广泛,高阻尼橡胶支座隔震系统已经在建筑和桥梁上得到了应用,鉴于它们能显著地减弱结构在遭受地震及其他动载荷的响应,这些基础隔震系统今后将会得到越来越广泛的应用<sup>[2-3]</sup>。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。到目前为止,这方面的工作鲜有开展。橡胶隔震支座健康监测所面临的一个挑战性问题是它的迟滞非线性行为,为此,首先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<sup>[4-9]</sup>,包括双线性模型,三线性模型,Bouc-Wen 模型以及多弹簧剪切模型(MSS 模型)等。在这些模型中,Bouc-Wen 模型更具灵活性,含有更多的可调节模型参数而得到了广泛的应用。

此外,参数识别也是土木结构健康监测系统的一项非常重要的工作。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的关注<sup>[10-11]</sup>。文献中研究了各种时域分析技术,主要包括最小二乘估计(LSE)<sup>[12-13]</sup>,贝叶斯估计<sup>[14]</sup>,广义卡尔曼滤波(EKF)<sup>[15-17]</sup>,H<sub>∞</sub>滤波<sup>[18]</sup>,蒙特卡罗滤波<sup>[19]</sup>和模型参考方法<sup>[20]</sup>等。在这些方法中,EKF 方法使用较为广泛,且同时适用于非线性系统和非平稳信号。将EKF 方法用于识别振动系统的结构参数不但可以改善低信噪比时的参数识别的精度,而且在外力可测的条件下,可以充分利用测得的全部信息,从系统的响应数据中,识别出比较完整的系统参数。

因此,本文采用Bouc-Wen 模型建立橡胶隔震支座的迟滞非线性模型,并根据已有的研究成果,固定其中的某些迟滞参数(采用已有文献给出的建议值),对模型进行简化以达到简单有效地描述隔震支座力学性能的目的。分别考虑有四迟滞参数、三迟滞参数和仅一个迟滞参数的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EKF 方法对这3个模型进行参数识别,并将识别的位移与测量值进行对比。

## 1 橡胶隔震支座迟滞模型

为了预测在强基础运动下的橡胶隔震支座的非线性行为,本文采用广泛应用于非线性建模的

Bouc-Wen 模型。

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

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

式中: $x$ 为相对位移; $z$ 为迟滞位移分量; $m$ 和 $c$ 分别为系统的质量和阻尼;系统恢复力 $R_T(x, z)$ 由式(1)表示

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

式中: $k$ 为结构刚度; $\alpha$ 表示屈服后和屈服前的刚度比( $0 \leq \alpha \leq 1$ )。迟滞位移分量由微分方程(3)描述

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

由方程(1~3)可以看出:Bouc-Wen 模型共包含 $A, \alpha, \beta, \gamma, n$ 五个迟滞参数和 $c, k$ 两个结构参数。通常 $A$ 可以取为1,因此,橡胶隔震支座迟滞模型参数缩减为 $c, k, \alpha, \beta, \gamma, n$ 。根据已有研究结果,对于天然橡胶支座,可以采用以下建议值<sup>[21]</sup>: $\beta = 0.5, \gamma = 0.5, n = 2$ ,本文在实验研究中采用EKF 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 EKF 算法

考虑一个具有 $m$ 个自由度的结构,其位移向量为 $\mathbf{x}$ ,速度向量为 $\dot{\mathbf{x}}$ 。引入一个广义状态向量 $\mathbf{Z}(t) = \{\mathbf{x}^T, \dot{\mathbf{x}}^T, \theta^T\}^T$ ,其中 $\theta^T = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ 一个 $n$ 维的待定参数向量,包括阻尼、刚度和迟滞非线性参数。结构的运动方程可以表示为

$$d\mathbf{Z}(t)/dt = \mathbf{g}(\mathbf{Z}, \mathbf{f}, t) + \mathbf{w}(t) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{w}(t)$ 为模型噪声,并假定它是零均值高斯白噪声,其方差矩阵为 $\mathbf{Q}(t)$ ; $\mathbf{f}$ 为激励向量。系统的离散非线性量测方程可表示为

$$\mathbf{Y}_{k+1} = \mathbf{h}(\mathbf{Z}_{k+1}, \mathbf{f}_{k+1}, k+1) + \mathbf{v}_{k+1} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{Y}_{k+1}$ 为 $t = (k+1)\Delta t$ 时刻的 $l$ 维量测向量, $\Delta t$ 为采样时间间隔; $\mathbf{v}_{k+1}$ 为量测噪声,假定为零均值高斯白噪声。则有方差矩阵 $\mathbf{E}[\mathbf{v}_k \mathbf{v}_j^T] = \mathbf{R}_k \delta_{kj}$ ,其中 $\delta_{kj}$ 为克罗内克符号。

令 $\hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k+1}$ 为 $t = (k+1)\Delta t$ 时刻 $\mathbf{Z}_{k+1}$ 的估计值, $\hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k}$ 为 $t = k\Delta t$ 时刻 $\mathbf{Z}_{k+1}$ 的估计值。基于自适应卡尔曼滤波方法,广义状态向量估计值 $\hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k+1}$ 的递推公式表示如下

$$\hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k+1} = \hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1}[\mathbf{Y}_{k+1} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k}, \mathbf{f}_{k+1}, k+1)] \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k} = \mathbf{E}\{\mathbf{Z}_{k+1} | \mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_k\} = \hat{\mathbf{Z}}_{k|k} + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} \mathbf{g}(\hat{\mathbf{Z}}_{t|k}, \mathbf{f}, t) dt \quad (7)$$

式中  $K_{k+1}$  为卡尔曼增益矩阵。

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} H_{k+1|k}^T [H_{k+1|k} P_{k+1|k} H_{k+1|k}^T + R_{k+1}]^{-1} \quad (8)$$

式中:  $P_{k+1|k}$  和  $H_{k+1|k}$  分别为

$$P_{k+1|k} = \Phi_{k+1,k} P_{k|k} \Phi_{k+1,k}^T + Q_{k+1} \quad (9)$$

$$H_{k+1|k} = [\partial h(Z_{k+1}, f_{k+1}, k+1) / \partial Z_{k+1}]_{z_{k+1} = z_{k+1|k}} \quad (10)$$

$$P_{k|k} = [I_{2m+n} - K_k H_k] P_{k|k-1} [I_{2m+n} - K_k H_k]^{-T} + K_k R_k K_k^T \quad (11)$$

式(9~11)中  $P_{k|k}$  为估计广义状态向量的误差方差矩阵。要进行递推求解,还需要选择待定系统参数  $\theta$  以及系统状态向量  $x$  和  $\dot{x}$  的递推初始值。同样,在递推公式中也需要对初始的估计广义状态向量的误差方差矩阵  $P_{0|0}$ , 量测噪声  $v(t)$  的方差矩阵  $R$ , 以及系统噪声  $w(t)$  的方差矩阵  $Q$  作出假设。

### 3 实 验

#### 3.1 实验模型和装置

实验模型为一个由 4 个橡胶隔震支座支撑质量块结构,质量块质量为  $m = 132 \text{ kg}$ , 实验装置如图 1 所示。在实验中将采用两种不同的地震波,利用激振器和滑轨式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 加速度传感器和 ASM WS10-250-10V-L10 型位移传感器,由加拿大 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有效性和 EKF 方法用于橡胶隔震支座参数识别的可行性和准确性。实验中所有信号的采样频率均为 200 Hz。

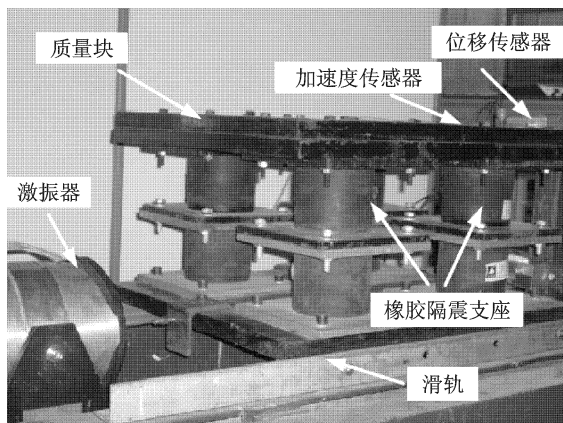
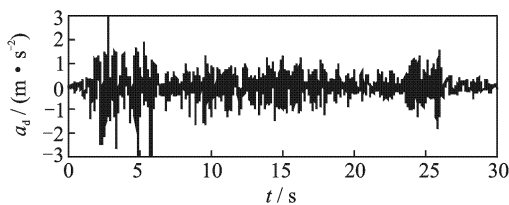


图 1 实验装置图

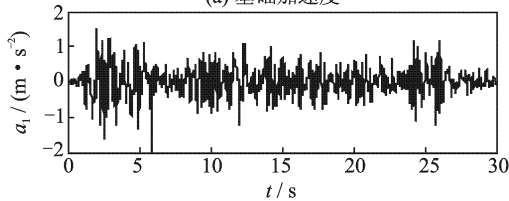
#### 3.2 实验结果

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

针对方程(1~3)描述的迟滞模型,分别考虑迟滞参数  $\alpha, \beta, \gamma, n$  均未知,以及  $\alpha, \beta, \gamma$  未知,  $n = 2$  和  $\alpha$

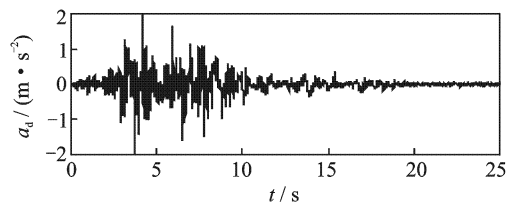


(a) 基础加速度

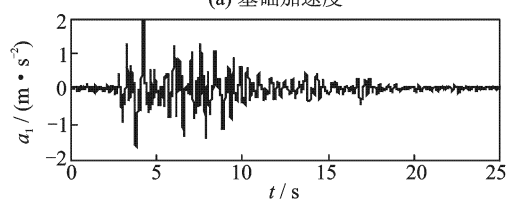


(b) 响应加速度

图 2 El Centro 地震波激励加速度及响应加速度



(a) 基础加速度



(b) 响应加速度

图 3 Kobe 地震波激励加速度及响应加速度

未知,  $n = 2, \beta = 0.5, \gamma = 0.5$  这 3 种情况。

#### 3.2.1 模型 I (四迟滞参数)

在式(3)中,  $A = 1.0$ , 则橡胶隔震支座的运动方程可写为

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + akx + (1-\alpha)kz = -m\ddot{x}_0(t) \\ \dot{z} = \dot{x} - \beta|\dot{x}||z|^{n-1}z - \gamma\dot{x}|z|^n \end{cases} \quad (12)$$

系统的广义状态向量为  $Z(t) = \{x, \dot{x}, z, c, k, \alpha, \beta, \gamma, n\}^T$ ,  $x$  和  $\dot{x}$  分别为相对位移和相对速度。则系统状态方程和观测方程可以写成如下形式

$$\dot{Z} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{z} \\ \dot{c} \\ \dot{k} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ -\ddot{x}_0 - (c\dot{x} + akx + (1-\alpha)kz)/m \\ \dot{x} - \beta|\dot{x}||z|^{n-1}z - \gamma\dot{x}|z|^n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + w(t) \quad (13)$$

$$y = \ddot{x} + \ddot{x}_0 + w = -(c\dot{x} + akx + (1-\alpha)kz)/m + v$$

式中  $\mathbf{v}$  为测量的噪声向量。

对模型基础施加 El Centro 地震波和 Kobe 地震波激励, 待定参数  $c, k, \alpha, \beta, \gamma$  和  $n$  的初始值分别为  $c_0 = 0.1 \text{ kN} \cdot \text{s}/\text{m}, k_0 = 10 \text{ kN}/\text{m}, \alpha_0 = 0.5, \beta_0 = 0.5, \gamma_0 = 0.5, n_0 = 0.5$ , 其他状态变量的初始值皆为 0, 即  $x_0 = 0, \dot{x}_0 = 0, z_0 = 0$ 。广义状态向量的误差方差矩阵  $\mathbf{P}_{0|0} = \text{diag}\{\mathbf{I}_3, 10^5 \mathbf{I}_6\}$ , 量测噪声  $\mathbf{v}(t)$  的方差矩阵  $\mathbf{R} = 25$ , 以及系统噪声  $\mathbf{w}(t)$  的方差矩阵  $\mathbf{Q} = 10^{-5} \mathbf{I}_9$ , 式中的  $\mathbf{I}_j$  为  $(j \times j)$  的单位矩阵。

基于测量的加速度响应(图 2, 3)和 EKF 方法, 识别得到的迟滞模型参数如图 4 所示, 识别出的橡胶隔震支座相对位移和绝对位移如图 5 所示。从图 4 中可以看出, 在不同的地震波激励下, 利用 EKF 方法识别出的迟滞模型参数一致, 且模型的迟滞参数与已有文献给出的建议值一致, 而且由图 5 可以看出, 不同地震波作用下, EKF 方法识别得到的位移和实际测量的位移吻合良好, 证明了 EKF 方法能有效地识别迟滞非线性模型的参数, 所得模型参数能够准确描述橡胶隔震支座的迟滞非线性力学性能。

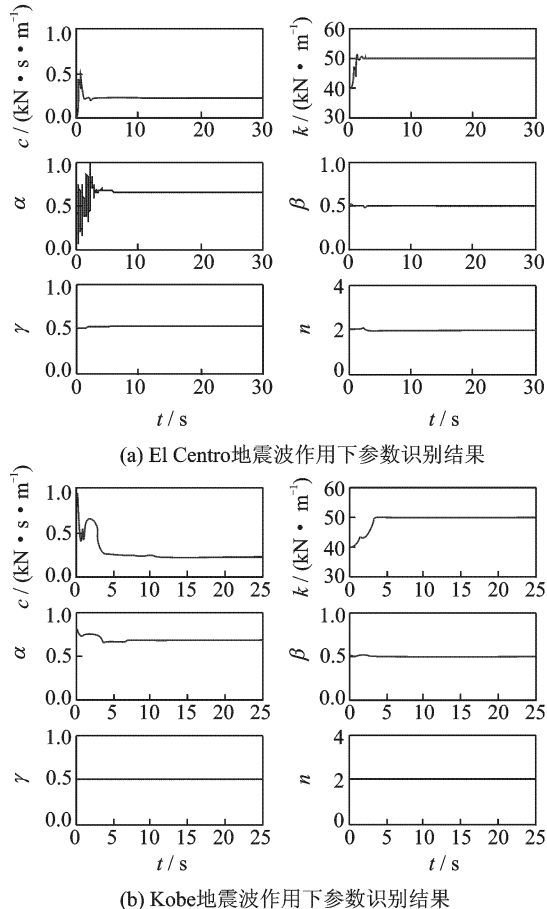


图 4 El Centro 和 Kobe 地震波激励下橡胶隔震支座的参数识别结果(四迟滞参数模型)

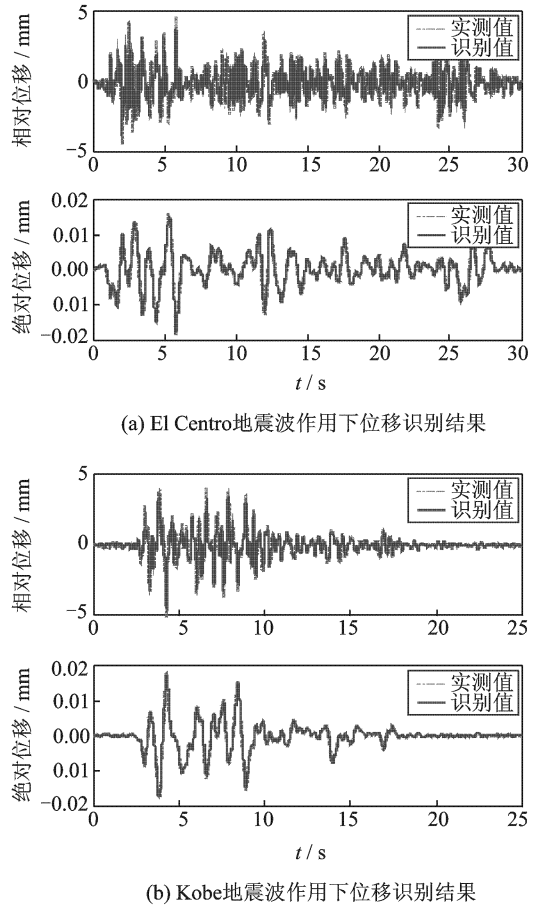


图 5 地震波激励下橡胶隔震支座的位移及相对位移识别结果(四迟滞参数模型)

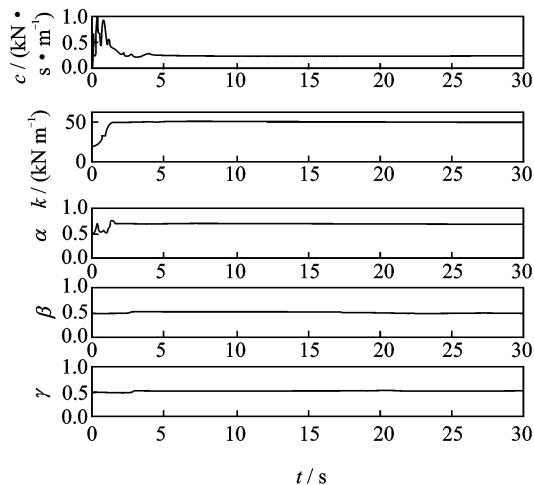
### 3.2.2 模型 II (三迟滞参数)

在四迟滞参数模型的基础上, 在方程(12)中, 取  $n$  为建议值 2, 则橡胶隔震支座模型迟滞参数减少为  $\alpha, \beta, \gamma$  三个, 系统的广义状态向量为  $\mathbf{Z}(t) = \{x, \dot{x}, z, c, k, \alpha, \beta, \gamma\}^T$ 。

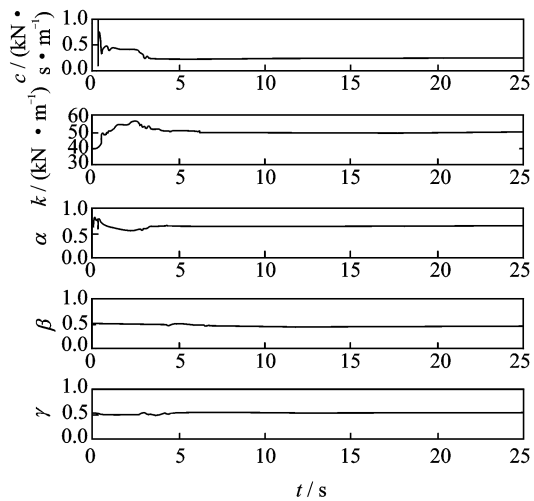
分别对模型基础施加 El Centro 地震波和 Kobe 地震波激励, 待定参数  $c, k, \alpha, \beta$  和  $\gamma$  的初始值分别为  $c_0 = 0.1 \text{ kN} \cdot \text{s}/\text{m}, k_0 = 10 \text{ kN}/\text{m}, \alpha_0 = 0.5, \beta_0 = 0.5, \gamma_0 = 0.5$ , 其他状态变量的初始值皆为 0, 即  $x_0 = 0, \dot{x}_0 = 0, z_0 = 0$ 。广义状态向量的误差方差矩阵  $\mathbf{P}_{0|0} = \text{diag}\{\mathbf{I}_3, 10^5 \mathbf{I}_5\}$ , 量测噪声  $\mathbf{v}(t)$  的方差矩阵  $\mathbf{R} = 10$ , 以及系统噪声  $\mathbf{w}(t)$  的方差矩阵  $\mathbf{Q} = 10^{-5} \mathbf{I}_8$ 。

基于测量的加速度响应(图 2, 3)和 EKF 方法, 识别得到的迟滞模型参数如图 6 所示, 识别出的橡胶隔震支座相对位移和绝对位移如图 7 所示。分别对比图 4 (a) 和图 6 (a) 以及图 4 (b) 和图 6 (b), 可以看出, 在相同的地震波激励下, 利用 EKF 方法对不同参数数量的迟滞非线性模型, 识别出的模型参

数基本相同,且模型的迟滞参数与已有研究成果一致。而且由图7也可以看出,在三参数迟滞模型中,EKF方法识别得到的位移和实际测量的位移也吻合良好,证明了该三迟滞参数模型能准确有效地描述实际橡胶隔震支座的迟滞非线性力学特性,采用 $n=2$ 简化四迟滞参数模型是合理可行的。



(a) El Centro地震波作用下参数识别结果



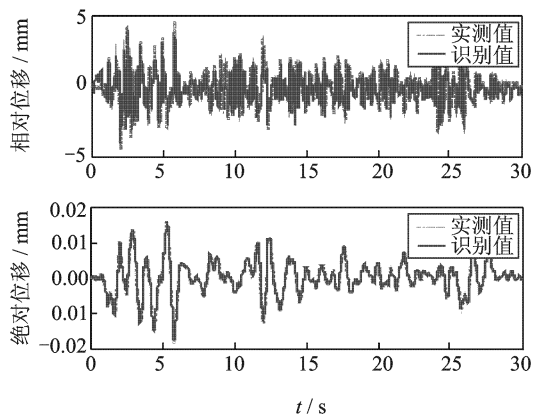
(b) Kobe地震波作用下参数识别结果

图6 地震波激励下橡胶隔震支座的参数识别结果(三迟滞参数模型)

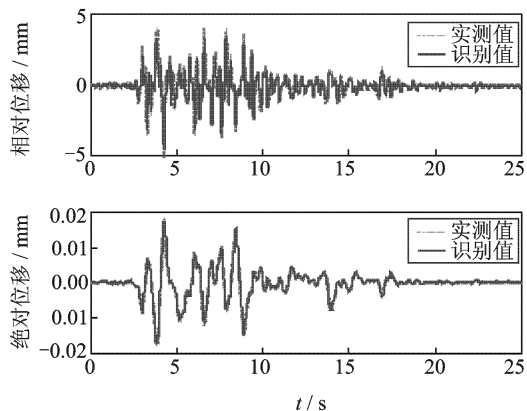
### 3.2.3 模型Ⅲ(一迟滞参数)

为达到简单有效描述橡胶隔震支座力学性能的目的,在三迟滞参数模型的基础上,将方程(12)中, $\beta, \gamma, n$ 均取为已有文献的建议值,即 $\beta=0.5, \gamma=0.5, n=2$ ,仅保留 $\alpha$ 这一个迟滞参数,则橡胶隔震支座迟滞模型的参数缩减为 $c, k, \alpha$ 三个,系统的广义状态向量为 $\mathbf{Z}(t) = \{x, \dot{x}, z, c, k, \alpha\}^T$ 。

分别对模型基础施加 El Centro 地震波和



(a) El Centro地震波作用下位移识别结果

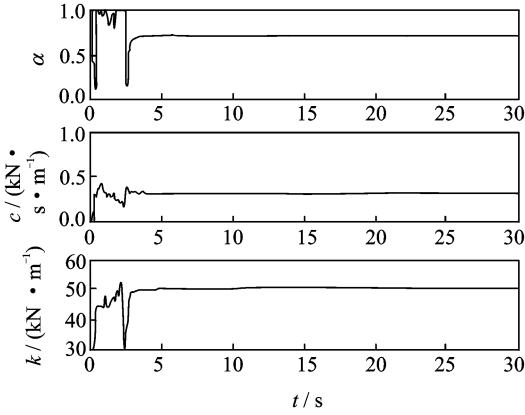


(b) Kobe地震波作用下位移识别结果

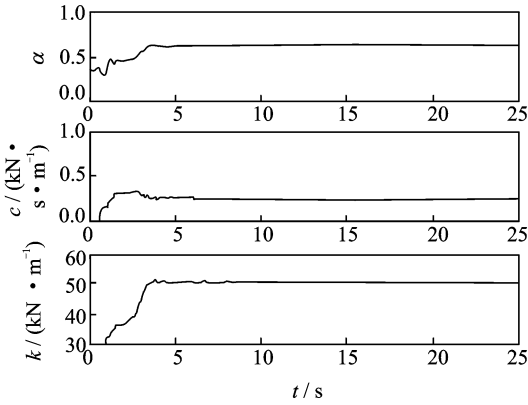
图7 地震波激励下橡胶隔震支座的位移及相对位移识别结果(三迟滞参数模型)

Kobe 地震波激励,待定参数 $c, k$ 和 $\alpha$ 的初始值分别为 $c_0=0.1 \text{ kN} \cdot \text{s}/\text{m}, k_0=10 \text{ kN}/\text{m}, \alpha_0=0.5$ ,其他状态变量的初始值皆为0,即 $x_0=0, \dot{x}_0=0, z_0=0$ 。广义状态向量的误差方差矩阵 $\mathbf{P}_{0|0} = \text{diag}\{\mathbf{I}_3, 10^5 \mathbf{I}_3\}$ ,量测噪声 $\mathbf{v}(t)$ 的方差矩阵 $\mathbf{R}=1$ ,以及系统噪声 $\mathbf{w}(t)$ 的方差矩阵 $\mathbf{Q}=10^{-5} \mathbf{I}_6$ 。

基于测量的加速度响应(图2,3)和EKF方法,识别得到的迟滞模型参数如图8所示,识别出的橡胶隔震支座相对位移和绝对位移如图9所示。分别对比四迟滞参数模型和三迟滞参数模型的参数识别结果,可以看出,在相同的地震波激励下,利用EKF方法对一迟滞参数模型,识别出的模型刚度、阻尼及 $\alpha$ 值与前两个模型对应的参数值相同。而且由图9也可以看出,在一参数迟滞模型中,EKF方法识别得到的位移和实际测量的位移也吻合良好,证明了EKF方法能有效地识别迟滞非线性模型的参数,所得模型参数能够准确描述实际橡胶隔震支座的迟滞非线性力学特性。

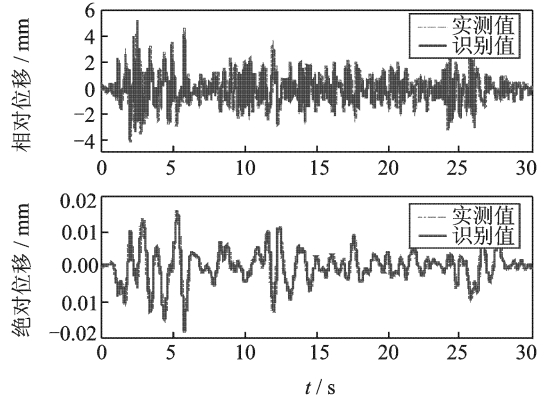


(a) El Centro地震波作用下参数识别结果

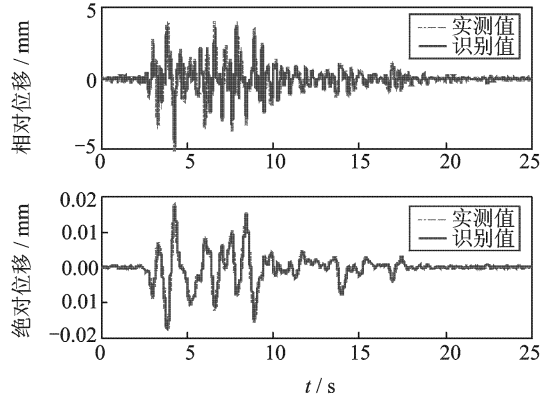


(b) Kobe地震波作用下参数识别结果

图8 地震波激励下橡胶隔震支座的参数识别结果(一迟滞参数模型)



(a) El Centro地震波作用下位移识别结果



(b) Kobe地震波作用下位移识别结果

图9 地震波激励下橡胶隔震支座的位移及相对位移识别结果(一迟滞参数模型)

## 4 结 论

本文采用 Bouc-Wen 模型对橡胶隔震支座的迟滞非线性特性进行建模,并采用在非线性系统参数识别中广泛使用的广义卡尔曼滤波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。使用不同的地震波激励,对橡胶隔震支座进行了振动台实验研究,利用实验测得的加速度响应对橡胶隔震支座进行了参数识别,并将识别的位移与实际测量得到的位移进行了对比。实验结果表明:

(1)在不同地震波基础激励下,利用EKF方法得到的橡胶隔震支座模型参数值一致,且识别得到的位移与实测值吻合良好,两者之间的误差主要是由于测量噪声引起,而信号的采样频率和EKF方法初值的选取对识别结果的精度也有一定的影响。

(2)对不同参数数量的橡胶隔震支座模型,使用EKF方法得到的模型参数基本相同,表明识别出的Bouc-Wen模型参数能有效地模拟橡胶隔震支座在地震波作用下的迟滞非线性特性。

(3)在不同地震波激励下,对不同参数数量的

橡胶隔震支座模型,EKF识别出的位移响应与实验实测的位移吻合良好,证明了EKF方法能有效、准确地识别橡胶隔震支座的结构参数,且该方法只需测量系统加速度响应和环境激励,就能够准确识别出系统的所有参数,使得该方法在实际应用中更易于实现,尤其是在橡胶隔震支座参数识别和健康状态评估方面将有很好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] Skinner R I, Robinson W H, McVerry G H. An introduction to seismic isolation[M]. Chichester and New York: John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- [2] Buckle I G, Nagarajaiah S, Ferrell K. Stability of elastomeric isolation bearings: Experimental study [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2002,128(1):3-11.
- [3] 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.

- [4] Tan R Y, Huang M C. System identification of a bridge with lead-rubber bearings[J]. *Computers and Structures*, 2000,74(3):267-280.
- [5] Wen Y K. Methods of random vibration for inelastic structures[J]. *Applied Mechanical Reviews*, 1989, 42(2):39-52.
- [6] Ma F, Zhang H, Bockstedte A, et al. Parameter analysis of the differential model of hysteresis[J]. *Journal of Applied Mechanics*, ASCE, 2004,71(3): 342-349.
- [7] Nagarajaiah S, Reinhorn A M, Constantinou M C. Nonlinear dynamic analysis of 3D-base isolated structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE,1991,117(7):2035-2054.
- [8] 汪新明,周丽. 基于振动响应的隔震支座的非线性建模及参数估计[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(1): 146-150.  
Wang Xinming, Zhou Li. Modeling of a rubber bearing and its parameters estimation based on its dynamic response[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008,27(1):146-150.
- [9] 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.
- [10] Magnus Nørgaard, Poulsen N K, Ravn O. New developments in state estimations for nonlinear system[J]. *Automatic*, 2000,36(11):1627-1638.
- [11] Wender R, Strauss A, Reiterer M, et al. Probabilistic Monitoring Concepts for jointless Bridges [C]// *Proceedings of the 7th International Workshop on Structural Health Monitoring*. Stanford, CA:[s. n.], 2009.
- [12] 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.
- [13] Yang J N, Lin S. On-line identification of nonlinear hysteretic structures using an adaptive tracking technique [J]. *International Journal of Non-linear Mechanics*, 2004, 39(9): 1481-1491.
- [14] 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.
- [15] Yang J N, Lin S, Huang H, et al. An adaptive extended Kalman filter for structural damage identification [J]. *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, 2006, 13(4): 849-867.
- [16] 吴新亚,周丽. 基于有限范围自适应卡尔曼滤波的结构损伤识别方法[J]. *振动工程学报*, 2007, 20(4): 401-406.  
Wu Xinya, Zhou Li. A Finite-horizon Adaptive Kalman Filter for Structural Damage Identification [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2007, 20(4): 401-406.
- [17] 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.
- [18] Sato T, Qi K. Adaptive  $H_{\infty}$  filter: Its application to structural identification [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1998, 124(11):1233-1240.
- [19] Yoshida I. Damage detection using Monte Carlo filter based on non-Gaussian noise[C]//*Proceedings of Structural Safety and Reliability*. Lisse: Swet & Zeitinger, 2001.
- [20] 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. Non-linear structural identification using a recursive model reference adaptive algorithm [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2006,19(3):341-345.
- [21] 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.