

# 剪切框架在未知地震作用下的识别方法及试验验证

许煌昊<sup>1</sup>, 刘朝<sup>2</sup>, 何明煜<sup>2</sup>, 雷鹰<sup>2\*</sup>

(1. 浙江大学宁波理工学院土木工程与建筑分院, 浙江 宁波 315100; 2. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 针对框架结构的绝对加速度响应部分观测、地震作用未观测的情况, 提出一种多层剪切框架结构诊断的方法. 该方法先依次采用扩展卡尔曼估计和递推最小二乘法对 1 层以上结构的扩展状态向量和未知作用力进行递推; 然后利用结构频率特征方程, 对第 1 层的结构参数进行估计; 最后基于数值求解一阶微分方程, 识别未观测的地震作用. 通过 1 个 4 层框架试验, 表明该方法能够很好地识别出结构参数和地震输入.

**关键词:** 结构参数识别; 未知地震力; 扩展卡尔曼估计; 最小二乘法

**中图分类号:** TB 122

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0438-0479(2014)06-0824-04

迄今, 国内外学者提出了不少地震作用下的损伤诊断的方法, 其中通过识别建筑结构动力参数, 以捕捉结构动力参数(如结构单元刚度)的改变, 进行结构损伤诊断是一种有效的途径<sup>[1-2]</sup>. 由于作用在建筑结构的地震作用力不易准确测量, 国内外学者也致力研究对结构动力参数与地震作用的复合识别(反演)<sup>[2-7]</sup>. 例如李杰等<sup>[8]</sup>给出了一种统计平均算法, 将基底作用力作为修正条件, 解决了基底输入未知时的参数识别问题, Zhao 等<sup>[9-10]</sup>提出了未知地震荷载作用下, 对多层剪切框架结构的混合识别方法, 论证了仅通用结构绝对加速度响应无法唯一确定结构动力参数和未知地震作用力, 但通过对观测信号采用最小二乘法与模态识别结果相结合, 可识别出多层框架结构动力参数和作用的地震荷载.

但上述方法都需要对结构绝对加速度、速度和位移响应全部进行观测. 由于实际中不可能在结构上安置大量的各种传感器对结构上的全部加速度、速度和位移都进行测量, 往往只能安置有限的加速度传感器, 得到结构局部自由度的绝对加速度响应<sup>[2-4]</sup>. 因此, 本文研究在结构绝对加速度响应部分观测、地震作用未观测的情况下, 框架结构动力参数与未知地震作用力的识别. 通过一个 4 层剪切框架在未知地震激励下的试验研究, 对提出的方法的适用性进行验证.

## 1 识别方法

多层剪切框架结构, 在地震作用下, 其绝对运动方程可以表示为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{C}\{\mathbf{I}\}\dot{\mathbf{x}}_g(t) + \mathbf{K}\{\mathbf{I}\}x_g(t), \quad (1)$$

其中:  $\mathbf{x}(t)$ ,  $\dot{\mathbf{x}}(t)$  及  $\ddot{\mathbf{x}}(t)$  分别表示结构的绝对位移、速度及加速度响应;  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{K}$  分别表示质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,  $\dot{\mathbf{x}}_g(t)$ ,  $x_g(t)$  分别为地面的绝对速度和位移,  $\{\mathbf{I}\}$  为元素为 1 的单位向量.

假设结构的阻尼为瑞利阻尼, 即:

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}, \quad (2)$$

其中  $\alpha, \beta$  为阻尼系数. 方程(1)可以改写为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \alpha \mathbf{M}\dot{\mathbf{x}}(t) + \beta \mathbf{K}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \alpha \mathbf{M}\{\mathbf{I}\}\dot{\mathbf{x}}_g(t) + \beta \mathbf{K}_g \dot{\mathbf{x}}_g(t) + \mathbf{K}_g x_g(t), \quad (3)$$

$$\mathbf{K}_g = [k_1, \dots, 0, 0]^T. \quad (4)$$

将方程(3)进一步改写为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \alpha \mathbf{M}\dot{\mathbf{x}}(t) + \beta \mathbf{K}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \alpha \mathbf{M}\{\mathbf{I}\}\dot{\mathbf{x}}_g(t) + \mathbf{B}^u f^u, \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{B}^u = [1, 0, \dots, 0]^T, \quad f^u(t) = \beta k_1 \dot{\mathbf{x}}_g(t) + k_1 x_g(t), \quad (6)$$

引入扩展状态向量:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1^T, \mathbf{X}_2^T, \mathbf{X}_3^T, \mathbf{X}_4^T]^T, \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{X}_1 = \mathbf{x}$ ;  $\mathbf{X}_2 = \dot{\mathbf{x}}$ ;  $\mathbf{X}_3 = [k_1, k_2, \dots, k_n]^T$ ;  $\mathbf{X}_4 = [\alpha, \beta]^T$ ; 考虑到方程(5)右端第 1 项作用较第 1 层未知外荷载要小许多, 可以忽略. 这样关于结构扩展状态向

收稿日期: 2013-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(51178406)

\* 通信作者: yleil@xmu.edu.cn

量的方程可以写为:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \end{cases} = \begin{cases} X_2 \\ M^{-1}(B^u f^u - (C)_{X_4} X_2 - (K)_{X_3} X_1) \\ 0 \\ 0 \end{cases}, \quad (8)$$

其中,  $(C)_{X_4}$  表示阻尼矩阵  $C$  由未知阻尼参数向量  $X_4$  组成,  $(K)_{X_3}$  表示刚度矩阵  $K$  由未知刚度参数向量  $X_3$  组成.

方程(8)可以写成如下扩展状态向量的非线性方程:

$$\dot{X} = g(X, f^u, t). \quad (9)$$

通常结构上只安置了有限的加速度传感器,因此离散形式的结构观测方程为:

$$Y[k] = D\dot{X}_2[k] + v[k] = D_r \{ - (C)_{X_4} X_2[k] - (K)_{X_3} X_1[k] \} + G^u f^u[k] + v[k], \quad (10)$$

其中,  $D$  为传感器放置位置矩阵,  $D_r = DM^{-1}$ ,  $G^u = DM^{-1}B^u$ ,  $Y[k]$  为在  $t=k \times \Delta t$  ( $\Delta t$  为采样时间步长) 时刻的观测向量,  $v[k]$  为测量噪声向量, 假定为均值等于 0, 协方差矩阵  $E[v_i, v_j^T] = R_i \delta_{ij}$  的高斯白噪声,  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 算子.

离散的观测向量可用以下非线性方程表示:

$$Y[k] = h(X[k], t[k]) + G^u f^u[k] + v[k], \quad (11)$$

根据扩展的卡尔曼预测估计预测, 有状态预测:

$$\hat{X}[k+1|k] = \hat{X}[k|k-1] + \int_{t[k]}^{t[k+1]} g(X, f^u, t) dt, \quad (12)$$

而状态估计为:

$$X[k+1|k] = \hat{X}[k+1|k] + K[k] \{ Y_r[k] - h(\hat{X}[k|k-1], \hat{f}^u[k], t[k]) \}, \quad (13)$$

其中  $K$  为最优增益矩阵<sup>[11]</sup>.

有了  $k+1$  时刻扩展状态向量的估计值, 可由  $k+1$  时刻观测方程(11), 利用最小二乘法, 对  $k+1$  时刻的未知激励  $f^u[k+1]$  进行如下估计:

$$f^u[k+1] = ((G^u)^T G^u)^{-1} (G^u)^T \{ Y[k+1] - h(\hat{X}[k+1|k], t[k+1]) \}, \quad (14)$$

这样就实现了分别对扩展状态向量  $X$  和未知力  $f^u$  进行识别.

对观测结构的绝对加速度响应通过快速傅里叶变换(FFT)进行频域分析. 采用峰值拾取法可以很好地估计识别结构的若干固有频率. 结构频率特征方程为:

$$| K - \omega^2 M | = 0. \quad (15)$$

由于直接用结构绝对加速度响应无法唯一同时识别结构动力参数  $k_1$  和未知地震作用力, 故可以基于行列式余子式, 在已知  $k_2, \dots, k_n$  的情况下, 计算得到  $k_1$ .

在识别框架结构参数的基础上, 利用估计得到的  $f^u$  离散值, 可以基于一阶微分方程(6), 采用 Newmark 法求解未知的地震加速度  $\ddot{x}_g(t)$ .

$$\begin{aligned} (a_2 k_1 \gamma \Delta t + k_1 \beta \Delta t^2) \hat{x}_g[k+1|k+1] &= \hat{f}_1^u[k+1|k+1] - k_1 \hat{x}_g[k|k] - (a_2 k_1 + k_1 \Delta t) \hat{x}_g[k|k] - \left\{ a_2 k_1 (1 - \gamma) \Delta t + k_1 \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \Delta t^2 \right\} \ddot{x}_g[k|k]. \end{aligned} \quad (16)$$

## 2 试验验证

为了验证本文提出的基于扩展卡尔曼预测估计和最小二乘法对结构参数和未知地震激励进行识别的有效性和实用性, 设计了 4 层剪切钢架模型进行试验研究. 4 层剪切钢架结构如图 1 所示, 主体长边长 350 mm, 短边长 250 mm, 设计结构层高为 206.8 mm, 楼板高度 33 mm, 楼层净高 173.8 mm, 钢片厚 4 mm, 宽 29 mm. 楼板质量(计入螺栓和层间钢板质量), 节点连接采用双排螺栓(图 1), 可近似地认为支撑与楼层之间的连接为固结. 结构所用材料全部为钢材, 其弹性模量  $E = 2.0 \times 10^{11}$  Pa, 密度  $\rho = 7.8 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>. 模型结构参数见表 1.

本次试验的地震模拟台是采用杭州亿恒科技有限公司生产的 HVS-1 地震模拟台, 在地震台和每层框架中间安装 PCB Piezotronics 公司生产的型号为 333B30 加速度计, 此传感器的分辨率高, 具有良好的相位匹配性, 适用于多通道模态分析、结构振动试验, 并采用北京东方振动和噪声技术研究所研发 INV306U-100k 数据采集仪及配套的滤波放大器进行数据采集.

本试验选用 1940 El Centro N-S 地震波为未知底部激励, 观测方程中只观测第 1, 2, 4 层加速度响应. 根据本文提出的算法, 识别结果分别见表 2 和图 2.

从识别结果可以看出, 实验框架的结构参数以及未知地震激励均得到很好的识别, 从而说明本文提出方法的有效性.

## 3 结论

本文提出一种在仅有部分观测结构绝对加速度响



图 1 4 层剪切框架试验模型

Fig. 1 Experimental model of 4-story shear-type building

表 1 试验框架质量、理论刚度和频率表

Tab. 1 Calculated value of the mass stiffness and frequency

楼层(频率阶)数	质量/kg	理论刚度/(kN·m <sup>-1</sup> )	理论频率/Hz
1	12.90	282.8	8.24
2	12.94	282.8	23.67
3	12.84	282.8	36.23
4	12.51	282.8	44.33

表 2 4 层框架刚度识别

Tab. 2 Identified story stiffness of the building

楼层编号	楼层刚度 $k_i$ /(kN·m <sup>-1</sup> )		误差/%
	真实值	识别值	
1	282.8	279.82	-1.05
2	282.8	281.55	-0.44
3	282.8	274.55	-2.92
4	282.8	278.23	-1.61

应的情况下,运用多层剪切框架进行结构动力参数与未知地震作用的识别方法.实验结果表明,该方法能很好地识别出结构参数和地震输入.与其他相关方法相比,提出的新方法仅需部分观测结构绝对加速度响应,且分析与计算简易,更适合工程实际.

本文研究了线性框架结构在未知地震作用下的

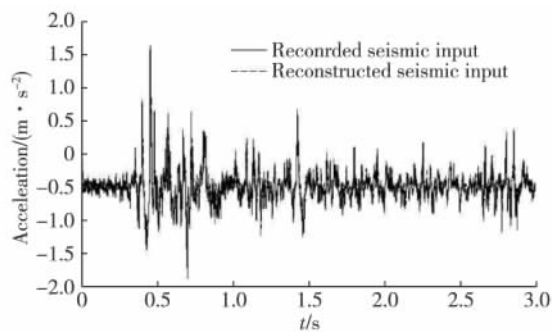


图 2 Elcentro 地震波激励识别与采集对比图

Fig. 2 Elcentro reconstructed seismic input compared with the recorded

识别,但对其他复杂类型结构在未知地震作用下的识别,尤其是结构进入非线性后的识别问题还值得进一步研究.

参考文献:

- [1] Wu Z S, Xu B, Harada T. Review on structural health monitoring for infrastructures[J]. Journal of Applied Mechanics, JSCE, 2003, 6: 1043-1054.
- [2] 李国强, 李杰. 工程结构动力检测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] Lei Y, Liu L J, Ni P H. Distributed detection of local damage in large-size structures under earthquake excitation[C]// Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China; IEEE, 2008: 140018.
- [4] Yang J N, Huang H W. An adaptive extended kalman filter for structural damage identifications II: unknown input[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2007, 14: 497-521.
- [5] Kathuda H, Martinez R, Hladar A. Health assessment at local level with unknown input excitation[J]. Structural Engineering, 2005, 131(6): 956-965.
- [6] 陈健云, 王建有. 部分输入未知条件下结构参数识别法研究[J]. 计算力学学报, 2005, 22(2): 149-154.
- [7] Ling X L, Haldar A. Element level system identification with unknown input with rayleigh damping[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(8): 315-320.
- [8] 李杰, 陈隽. 部分输入未知时求解动力复合反演问题的补偿算法[J]. 计算力学学报, 2008, 19(3): 312-314.
- [9] Zhao X, Xu Y L, Li J, et al. Hybrid identification method for shear buildings with unknown seismic input: theory[J]. Sound and Vibration Control, 2006, 291: 215-239.
- [10] Zhao X, Xu Y L, Li J, et al. Hybrid identification method for shear buildings with unknown seismic input: experimental investigation[J]. Engineering Structures, 2005,

27:1234-1247.

- [11] Lei Y, Lei J Y, Song Y. Element level structural damage detection with limited observations and with unknown

inputs [C] // Proceedings of SPIE' s Conference on Health Monitoring of Structural and Biological Systems. San Diego, CA, USA; SPIE, 2007: 65321.

## Identification Method for Shear Building Under Unknown Seismic Excitation with Experimental Validation

XU Huang-hao<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>2</sup>, HE Ming-yu<sup>2</sup>, LEI Ying<sup>2\*</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China;  
2. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** A method is proposed for the identification of multi-story shear buildings under unknown seismic excitation with partial observations of structural absolute acceleration responses. Based on sequential application of the extended Kalman estimator and the least squares estimation, structural parameters above the first story of a building can be identified. Then, structural parameters of the first story can be identified from the frequency equation. Finally, the unknown earthquake excitation can be identified via the numerical solution of a first-order differential equation. Lab experiments of a 4-story shear building on a shaking table test have validated that the proposed method can determine structural parameters and the earthquake excitation with satisfactory accuracy.

**Key words:** structural parameter identification; unknown earthquake excitation; extended Kalman estimator; least-square estimation