

环境激励下剪切型结构层间刚度识别的新方法

王 卓, 闫维明

(北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 研究环境激励下剪切型结构的层间刚度识别问题, 提出了一种新的解决方法. 该方法采用自然激励技术实现结构随机响应向确定性响应的过渡; 推演了剪切型结构自由振动的参数解耦方程, 简化了识别过程, 降低了计算量. 将自然激励技术、参数解耦方法和扩展卡尔曼滤波算法三者有效结合, 为环境激励下剪切型结构的刚度识别提供了一个较好的解决方案. 以一个6自由度剪切型结构为例, 对该方法进行了数值模拟, 结果表明: 该方法能比较准确地识别结构层间刚度, 可用于剪切型结构健康监测的实际工程.

关键词: 结构; 环境激励; 自然激励技术; 解耦; 卡尔曼滤波; 识别

中图分类号: TU 356; O 327

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2009)07 - 0928 - 05

物理参数识别是结构健康监测研究的重点之一, 根据物理参数(尤其是刚度)的变化能够直接判定结构是否出现损伤以及损伤的位置和程度. 在结构健康监测的实际工程中, 可利用的激励方式往往仅限于环境激励, 在这种难于观测的激励条件下, 有效地获取物理参数具有重要的理论和实际意义. 结构的物理参数识别方法可分为两大类, 直接法和间接法. 直接法利用结构动力响应数据直接识别物理参数^[1-3], 也被称为时域识别法; 间接法先利用动力响应识别结构模态参数, 然后再由模态参数反演物理参数^[4-6]. 直接法能够实现物理参数的在线识别, 这是其优于间接法的重要方面. 本文采用直接法的思路, 面向剪切型结构, 综合运用自然激励技术、参数解耦方法和扩展卡尔曼滤波算法, 提出一种基于环境激励的物理参数识别新方法, 用于识别剪切型结构的层间刚度.

1 自然激励技术

现实中的工程结构往往规模庞大, 几乎不可能实现人工激励, 因此, 利用环境激励(如地脉动、交通荷载、风荷载等)下的结构响应进行参数识别是一种极具前景的方法. James 等^[7]提出了自然激励技术(natural excitation technique, NExT), 证明了在环境激励满足正态白噪声的条件下, 结构位移响应的互相关函数满足自由振动方程, 即

$$M\ddot{R}_{|X|X_r}(\tau) + C\dot{R}_{|X|X_r}(\tau) + KR_{|X|X_r}(\tau) = 0 \quad (1)$$

其中, M 、 C 和 K 分别为结构的质量、阻尼和刚度矩阵, $R_{|X|X_r}(\tau)$ 为全部自由度关于第 r 自由度的位移响应互相关函数矩阵. Beck 等^[8]采用类似方法证明了加速度响应的互相关函数同样满足自由振动方程. 因此, 可利用环境激励下结构加速度响应的互相关函数来代替结构的自由振动响应, 实现结构随机响应向确定性响应的过渡.

2 剪切型结构自由振动的参数解耦方程

对于图 1 所示的层间剪切型结构模型, 当仅考虑单向水平自由度时, 其计算模型的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵具有如下形式:

收稿日期: 2007-11-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878101); 国家自然科学基金重大研究计划重点资助项目(90715032).

作者简介: 王 卓(1981—), 男, 河北石家庄人, 博士研究生.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & m_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & m_n \end{bmatrix} \\
 \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -c_1 & c_1+c_2 & -c_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -c_{n-2} & c_{n-2}+c_{n-1} & -c_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -c_{n-1} & c_{n-1}+c_n \end{bmatrix} \\
 \mathbf{K} &= \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1+k_2 & -k_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -k_{n-2} & k_{n-2}+k_{n-1} & -k_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -k_{n-1} & k_{n-1}+k_n \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

由加速度响应互相关函数表示的振动方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{R}}|\ddot{\mathbf{X}}|\ddot{\mathbf{X}}_r(\tau) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{R}}|\ddot{\mathbf{X}}|\ddot{\mathbf{X}}_r(\tau) + \mathbf{K}\mathbf{R}|\ddot{\mathbf{X}}|\ddot{\mathbf{X}}_r(\tau) = 0 \quad (2)$$

令 $\{\mathbf{Y}\} = \mathbf{R}|\ddot{\mathbf{X}}|\ddot{\mathbf{X}}_r(\tau)$, 并定义 $y_{i,j}$ 为质点 i 与质点 j 分别关于质点 r 的加速度响应互相关函数的相对值, 即 $y_{i,j} = y_i - y_j$, 并且令 $y_{n+1} = 0$, 根据这些定义, 可将文献[9]提出的解耦算法推广到自由振动方程, 得到任意质点 k 的运动方程为

$$m_k \ddot{y}_{k,k+1} + c_k \dot{y}_{k,k+1} + k_k y_{k,k+1} = -m_k \ddot{y}_{k+1} - \sum_{l=1}^{k-1} m_l \ddot{y}_l, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

将式(3)进一步改写, 有

$$m_k \ddot{z}_k + c_k \dot{z}_k + k_k z_k = f_k, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

其中, $z_k = y_{k,k+1}$, $f_k = -m_k \ddot{y}_{k+1} - \sum_{l=1}^{k-1} m_l \ddot{y}_l$.

式(4)表明: 当 z_k 和 m_k 已知时, 从参数识别的角度看, 式(2)可以完全解耦, 即多自由度剪切型结构自由振动方程可以分解成多个单自由度系统在相应荷载 f_k 作用下的强迫振动方程. 不难看出, 通过对式(2)的解耦, 能简化识别方程和降低计算量, 尤其对于自由度数目较多的情况, 这为识别算法的计算机程序实现带来极大方便.

3 扩展卡尔曼滤波参数辨识模型

针对式(4)定义状态变量矩阵

$$\mathbf{S} = [s_1 \quad s_2 \quad s_3 \quad s_4]^T \quad (5)$$

其中 $s_1 = z_k$, $s_2 = \dot{z}_k$, $s_3 = k_k$, $s_4 = c_k$, 则式(5)可改写为

$$\dot{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} \dot{s}_1 \\ \dot{s}_2 \\ \dot{s}_3 \\ \dot{s}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_2 \\ -s_4 s_2 / m_k - s_3 s_1 / m_k + f_k / m_k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{F}(\mathbf{S}, t) \quad (6)$$

式(6)是关于状态变量的非线性方程, 将其写成离散形式并补充观测方程, 有

$$\dot{\mathbf{S}}_i = \mathbf{F}(\mathbf{S}_i, t_i) \quad (7)$$

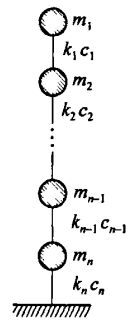


图1 结构模型示意图

Fig.1 Scheme of structural model

$$\{z_k\}_i = h(S_i, t_i) + \{v\}_i \quad (8)$$

其中 $h(S_i, t_i)$ 为观测向量函数, 可根据实际需要确定, v 为零均值观测噪声向量.

通过在滤波估计值附近作线性化处理, 即在采样时间间隔内用增量线性方程代替原非线性方程, 即可获得关于系统状态的扩展卡尔曼滤波系列公式^[10]. 由此可见, 扩展卡尔曼滤波参数辨识算法的实质是: 在已知结构质量的条件下, 将结构的刚度系数和阻尼系数作为状态变量, 利用其导数为零的特征, 将其并入卡尔曼滤波器的状态方程和观测方程, 然后, 在对结构振动测量数据进行滤波、估计的同时进行刚度系数和阻尼系数的预测和估计.

4 算例分析

4.1 分析模型的基本信息

以自由度数目 $n=6$ 的剪切型结构(如图 1 所示)为例进行刚度识别的数值模拟, 由于环境激励的振动量级很小, 因此可认为结构处于线性振动状态. 结构的基本参数由表 1 给出, 采用比例阻尼假定, 阻尼比取 0.02. 作用于基底的环境激励由带宽为 0.5~40 Hz 的白噪声信号模拟, 取 8 000 个采样点, 采样间隔 0.01 s, 利用 Wilson- θ 法求解环境激励下结构各层的加速度响应.

表 1 结构模型的基本参数
Table 1 Basic parameters of structural model

i	m_i/T	$k_i/(MN \cdot m^{-1})$	i	m_i/T	$k_i/(MN \cdot m^{-1})$
1	200	100	4	300	200
2	300	200	5	300	200
3	300	200	6	300	250

4.2 识别过程及结果

首先, 以顶层的加速度响应为参考, 对各层加速度做互相关运算. 采用先计算响应互功率谱, 再由傅里叶逆变换得到互相关函数的方法, 并在算法中使用频域平均技术以提高信噪比, 其中互相关函数的数据长度取 1 024 点. 之后, 对得到的互相关函数进行一次和二次数值微分并进行平滑处理, 图 2 给出了底层加速度互相关函数及其一次和二次微分结果.

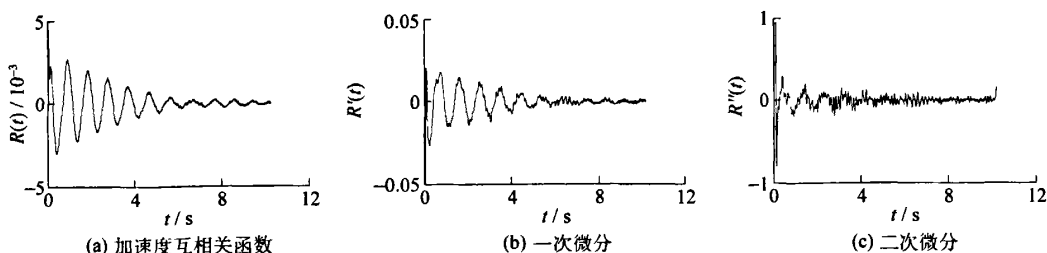


图 2 结构底层加速度互相关函数及其一次和二次微分

Fig. 2 Acceleration cross-correlation function and its derivatives of bottom story

假定能较为准确地获得结构质量的估计值, 然后利用参数解耦方程计算解耦后各单自由度系统的输入和输出数据, 即利用上一步的计算结果分别计算 f_k , $\ddot{z}_k$, $\dot{z}_k$ 和 z_k , 其中 $k=1, 2, \dots, 6$.

最后, 使用扩展卡尔曼滤波算法对各个单自由度系统进行识别. 笔者分别选取了与 k_i 和 c_i 的真实值相差较大的值作为滤波初值, 发现识别结果均能收敛到几乎相同的数值, 并且收敛速度差别不大. 图 3 给出了部分层间刚度的收敛曲线, 其中的点划线为层间刚度的真实值, 可见, 经过 100 个数据点的迭代运算

后, 刚度值即基本趋于稳定, 证明识别算法具有很快的收敛速度。

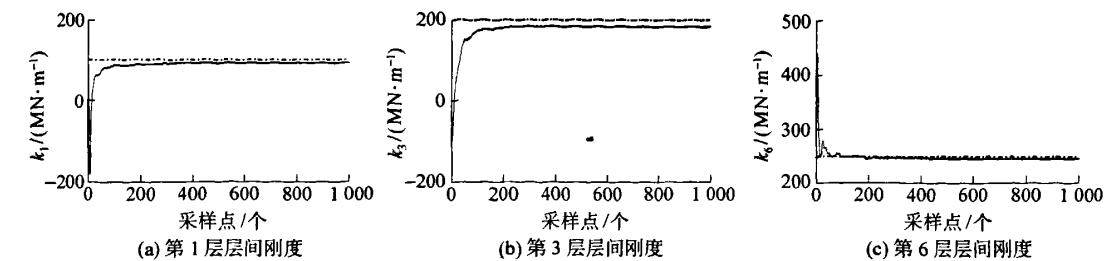


图 3 部分层间刚度的收敛曲线
Fig. 3 Convergence curves of inter-story stiffness

表 2 给出了识别结果, 可见, 结构各层的刚度识别值略小于真实值, 最大的识别误差为 6.56%, 表明识别方法比较可靠。另外, 当增加环境激励的采样数据长度, 根据各态历经性假定, 结构响应将更接近正态白噪声的假定, 物理参数的识别误差将随之减小, 而环境激励是可不受采样时间限制的, 因此, 该方法对于环境激励下剪切型结构的层间刚度识别具有独特优势。

表 2 层间刚度识别结果及误差

Table 2 Identification results and errors of inter-story stiffness					
i	k_i 识别值/(MN·m ⁻¹)	识别误差/%	i	k_i 识别值/(MN·m ⁻¹)	识别误差/%
1	93.4	6.56	4	188.0	6.00
2	190.0	5.00	5	188.8	5.60
3	189.9	5.01	6	246.5	1.40

5 结束语

本文综合运用自然激励技术、参数解耦方法和扩展卡尔曼滤波算法, 提出了一种环境激励下剪切型结构刚度识别的新方法, 该方法具有算法简单、求解速度快的优点, 并使用了频域平均技术, 很大程度地抑止了噪声干扰。仿真分析的结果表明: 使用本文提出的方法能获得准确度较高的识别结果, 具有较强的工程应用价值。

致谢: 感谢美国阿拉斯加大学安科雷奇工学院土木工程系刘荷教授提供的资料和给予的指导!

参考文献:

[1] ZHENG Yi-bin, WANG Man-sheng, LIU He, et al. Time-domain identification of dynamic properties of layered soil by using extended kalam filter and recorded seismic data[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 3(2): 237-247.

[2] 谢献忠, 易伟建. 结构物理参数时域识别的子结构方法研究[J]. 工程力学, 2005, 22(5): 94-98.
XIE Xian-zhong, YI Wei-jian. A substructure method for parameter estimation in time domain[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(5): 94-98. (in Chinese)

[3] 樊素英, 李忠献. 桥梁结构物理参数识别的双单元子结构法[J]. 工程力学, 2007, 24(6): 68-72.
FAN Su-ying, LI Zhong-xian. A double-element substructure method for physical parameter identification of bridge structures [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(6): 68-72. (in Chinese)

[4] JUAN M C, SHIRLEY J D, ERIK A J. Natural excitation technique and eigensystem realization algorithm for phase I of the IASC-ASCE benchmark problem: simulated data[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(1): 49-60.

[5] 王树青, 李华军. 利用消去刚度法进行剪切型系统物理参数识别[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(6): 1085-1089.

- WANG Shu-qing, LI Hua-jun. Stiffness elimination algorithm for physical parameters identification of shearing structures [J]. Periodical of Ocean University of China, 2004, 34(6): 1085-1089. (in Chinese)
- [6] 易伟建, 周云. 基于高阶局部模态的弹性地基上框架结构物理参数识别研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(1): 117-124.
- YI Wei-jian, ZHOU Yun. Research on physical parameter identification of concrete frame structure on elastic foundation based on higher modes[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(1): 117-124. (in Chinese)
- [7] JAMES G H, CARNE T G, LAUFFER J P. The natural excitation technique for modal parameter extraction from operating wind turbines[R]. Sandia: Sandia National Laboratories, 1993.
- [8] BECK J L, VANIK M W, KATAFYGIOTIS L S. Determination of model parameters from ambient vibration data for structural health monitoring[C]//Proc, 1st World Conf on Structural Control, Pasadena, Calif; [s. n.], 1994: 3-12.
- [9] 宝志雯, 史文月. 基于推广卡尔曼滤波算法的结构模型的参数识别[J]. 振动与冲击, 1990, (1): 11-21.
- BAO Zhi-wen, SHI Wen-yue. Parameter identification of structural models by means of extended kalmanfilter algorithm[J]. Vibration and Shock, 1990, (1): 11-21. (in Chinese)
- [10] 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: 153-159.

New Method for Inter-story Stiffness Identification of Shearing Structures Under Ambient Excitation

WANG Zhuo, YAN Wei-ming

(Beijing Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology,
Beijing 100124, China)

Abstract: Inter-story stiffness identification of shearing structures under ambient excitation was studied and a new method was presented. In the method, the transition from structural random response to deterministic response was realized by the natural excitation technique (NExT). The parameter-decoupled free vibration equation of shearing structures was deduced, and the equation could simplify the process of identification and reduce the amount of calculation. Through the effective combination of the NExT, the parameter-decoupled method and the extended Kalman filter (EKF) algorithm, a good scheme was presented for inter-story stiffness identification of shearing structures under ambient excitation. Using a shearing structure with six-degree-of-freedom as example, the scheme was tested by numerical simulation. The results show that the inter-story stiffness can be identified basically with accuracy, and the scheme can be applied in practical projects for health monitoring of shearing structures.

Key words: structures; ambient excitation; natural excitation technique; decoupling; Kalman filtering; identification

(责任编辑 张 蕾)