

# 基于附加虚拟支座的结构损伤识别方法

侯吉林<sup>1</sup>, 欧进萍<sup>1,2</sup>, Łukasz Jankowski<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学 土木工程学院, 大连 116024; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090;

3. 波兰科学院 基础技术研究所智能技术部, 华沙 02-106, 波兰)

**摘要:** 针对土木工程中实测模态相对较少, 很难进行大型结构的损伤识别的困难, 提出附加虚拟支座的损伤识别方法。该方法利用约束子结构方法在结构上附加虚拟支座来增加结构形式的方法, 增加识别模态的数量, 从而实现结构的准确损伤识别。约束子结构方法的基本思想是通过响应的卷积组合为零将传感器转化为虚拟支座。将附加虚拟支座后的结构定义为虚拟结构, 每个虚拟支座对应一个虚拟结构, 那么在结构上不同位置附加虚拟支座, 则可以获得多个虚拟结构的模态; 联合所有虚拟结构和对应的频率即可准确快速的识别出整体结构的损伤。最后通过三层空间框架模型验证方法的有效性。

**关键词:** 结构健康监测; 损伤识别; 约束子结构方法; 灵敏度分析; 频率

**中图分类号:** TU311.3 **文献标识码:** A

## Structural damage identification using additional virtual supports

HOU Ji-lin<sup>1</sup>, OU Jin-ping<sup>1,2</sup>, Łukasz JANKOWSKI<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

3. Smart-Tech Centre, Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, 02-106, Warsaw, Poland)

**Abstract:** Usually only some lower modes are identified in civil engineering, so it is hard to estimate the damage of large structure accurately. Aiming at this problem, the method of adding virtual supports on the structure was proposed for structure damage identification. The virtual supports were constructed by the substructure isolation method using the linear combination of responses. The structure with additional support is called after virtual structure. The styles of the virtual structure are various by adding virtual supports on different places of the structure. The natural frequencies of all the virtual structures were then collected and used for damage identification. A 3-D frame model was built for the verification of proposed method.

**Key words:** structure health monitoring; damage identification; substructure isolation method (SIM); sensitivity analysis; natural frequency

结构健康监测是土木工程中的研究热点方向之一, 而损伤识别为结构健康监测的重要理论环节, 它为结构的健康和安全评分提供可靠的理论指导。然而由于土木工程结构自身的特点, 使得对结构进行准确的损伤识别还存在一定困难, 比如结构的大型化和复杂化, 传感器测试信息的误差性和有限性, 以及整体结构动态信息对局部损伤的不敏感性等。

土木工程中结构损伤一般表现为结构刚度的变

化, 当结构中某些构件发生损伤时, 结构的模态参数(频率和振型)也会发生变化。模态是结构最基本的动态信息, 而且利用动态响应进行模态识别方法研究也比较成熟, 如随机子空间方法<sup>[1]</sup>和特征系统实现法<sup>[2]</sup>等, 所以基于模态信息的损伤识别方法是土木结构中最常用的方法之一。Wang等<sup>[3]</sup>通过模态灵敏度分析对香港青马大桥有限元模型进行损伤识别。赵建华等<sup>[4]</sup>通过计算结构损伤前后频率和振型的变化, 由控制方程确定出结构损伤位置和大小。韩东颖等<sup>[5]</sup>基于频率和当量损伤系数识别井架钢结构损伤。施洲等<sup>[6]</sup>在考虑边界条件变异, 利用模态的扰动进行桥梁结构的损伤识别。然而利用结构模态识别大型结构损伤一般存在以下三个困难: ① 实际工程中往往只能识别出少数低阶模态, 识别的模态数量一般小于远远结构构件的数量, 这是大型结构进行准确损伤识的主要困难;

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB036305); 国家自然科学基金项目(51108057&51108066); “十二五”国家科技支撑项目(2011BAK02B01 & 2011BAK02B03); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(DUT13LK13); 中国博士后基金特别资助(2012T50255)

收稿日期: 2012-09-07 修改稿收到日期: 2012-10-09

第一作者 侯吉林 男, 博士, 讲师, 1979年12月生

② 低阶模态参数往往反映的是整体特征,而对局部损伤更为敏感的高阶模态一般较难识别出来;③ 土木工程结构多为对称形式,某些构件发生损伤对结构模态影响是相同的,因此仅根据模态的变化很难区分具体损伤的位置。

由于实测数据的质量和模态识别方法的限制,只利用单个结构的实测数据所识别的模态数量往往是有限的。为了增加识别模态的数量,可通过不断改变结构形式的方法来提高测试对象的数量,如在结构上附加质量或者刚度。杨秋伟等<sup>[7]</sup>通过在原结构的不同位置附加已知的集中质量增加结构形式,提高动态测试的数据量。杨智春等<sup>[8]</sup>通过给原结构添加已知刚度系数的元件,提高了试验结构的数量,联合新结构和原结构的模态数据识别损伤参数。然而在实际土木工程中,有时并不容易将质量和刚度元件安装或连接到实际结构上,如连接器件的设计、操作空间等都是需要考虑的问题。

本文利用约束子结构方法<sup>[9]</sup>可构造虚拟支座的思想,通过在结构上布置虚拟支座增加结构的形式,一定程度上避免了在实际工程中附加真实质量或刚度的困难。约束子结构方法的基本思想是利用子结构响应的卷积组合将子结构边界的传感器转化为虚拟支座,从而将子结构从整体分离出整体。本文分别在结构每个构件上附加虚拟支座,将每个附加虚拟支座后对应的新结构定义为一个虚拟结构,联合所有这些虚拟结构和对应的模态,既可以准确的识别出结构所有构件对应的损伤因子。针对现有大型结构损伤识别的困难,附加虚拟支座方法有以下三个特点:① 在不同位置附加虚拟支座可提高虚拟结构的数量,增加了识别模态的数量;② 合理布置虚拟支座,可提高模态对损伤的灵敏度;③ 附加虚拟支座改变了结构形式,将对称结构变为非对称结构,更有利于结构损伤的准确定位和识别。

本文首先简单介绍约束子结构方法,然后基于灵敏度推导联合多个虚拟结构的损伤识别方法,最后通过一个空间框架模型验证方法的有效性。

## 1 约束子结构损伤识别方法

分别在子结构边界和内部布置  $n$  个和  $l$  个传感器。将施加在子结构边界或外部的脉冲激励定义为‘约束激励’,该方法需施加  $n$  组不同的约束激励,第  $i$  组激励下对应边界的第  $j$  个传感器的脉冲响应为  $a_{ji}$ 、内部的第  $k$  个传感器的脉冲响应为  $c_{ki}$ ,这些响应为‘约束响应’。定义施加在子结构内部的激励为‘基本激励’,在子结构的内部施加  $m$  组不同基本激励,设第  $j$  组激励为  $f_j$ ,在  $f_j$  的激励下子结构边界上  $n$  个传感器的响应和子结构内部  $l$  个传感器的响应分别为  $b_j$ 、 $d_j$ ,定义它们为‘基

本响应’。将上面的矩阵排列为矩阵,  $A_{ji} = [a_{ji}]$ ,  $A = [A_{ji}]$  和  $C_{ki} = [c_{ki}]$ ,  $C = [C_{ki}]$ ,  $B = [b_1, b_2, \dots, b_m]$  和  $D = [d_1, d_2, \dots, d_m]$ ,  $A$  和  $C$  为约束响应矩阵,  $B$  和  $D$  为基本响应矩阵。将矩阵  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  代入约束方程式<sup>[9]</sup>,见式(1),可以将子结构边界响应限制为零,即相当于将边界传感器转化为虚拟支座,从而将子结构从整体中分离出来为独立的约束子结构模型,那么计算得到的矩阵  $D_s$  为约束子结构的响应,其中第  $j$  列响应  $d_{s,j}$  为等价于约束子结构在基本激励  $f_j$  作用下的内部第  $l$  个传感器的响应。然后根据激励  $f_j$  的特点,通过选择合适的优化识别方法,可利用约束子结构模型进行子结构的损伤识别:当  $f_j$  已知时,可利用激励和时域响应信息进行识别<sup>[10]</sup>;当  $f_j$  为瞬态激励时,由瞬态激励结束后结构的自由响应识别出模态(频率和振型),然后利用模态识别结构损伤。本文方法中  $f_j$  为瞬态激励,损伤识别时只利用频率信息即可,后面再详细介绍。

$$D_s = D - CA^+ B \quad (1)$$

需要注意的是,本方法要求结构为线性结构,另外约束激励的方向应沿着所构造虚拟支座对应传感器测量的方向。

## 2 基于虚拟支座的损伤识别方法

由上节可知,约束子结构方法可以将传感器转化为虚拟支座,而且虚拟支座的布置可以根据结构的特点更灵活的布置,不局限于布置在子结构的边界。由模态灵敏度分析可知(参见式(3)),模态关于构件的灵敏度与构件的刚度有直接关系,将支座附加到构件的中间位置对构件刚度改变最大,所以本文将虚拟支座布置到构件的中间位置。本文将附加虚拟支座后的结构称为虚拟结构。一个虚拟支座只能提高一个构件的灵敏度,所以将虚拟支座分别附加到结构所有构件的中间位置,不但可以提高所能识别模态的数量,还能提高其模态对构件损伤的灵敏度,这为结构损伤识别提供了有力的条件。

由于分别在每个构件附加了虚拟支座,使每个构件都有对应灵敏度高的频率,也就是说频率的数目大于等于结构构件的数目,所以只利用频率信息就足够对结构进行损伤识别,而不需要模态中的振型信息。由模态分析可以知道,结构频率理论上由一个测点的响应即可以识别出来,但是振型则需要较多测点才能把结构振动的形状准确地描述出来。本文基于虚拟支座的方法只需要频率信息即可,所以该方法理论上只需要两个传感器:一个传感器用于构造虚拟支座,一个传感器用于识别布置虚拟支座后结构的频率,然后通过传感器的移动布置,实现对结构所有构件的测量。利用测量的响应由约束子结构方法分别在每个构件上布置虚拟支座,使各个对应虚拟结构都含有对相应构

件损伤灵敏较高的模态(频率),从而收集并联合所有这样的频率,利用频率灵敏度矩阵对损伤进行迭代求解。

2.1 理论推导

假设一结构有  $n$  个构件需要识别,第  $j$  个构件的扩展刚度矩阵  $K_j$ 。这里假设构件损伤后只有弹性模量发生了变化,质量不发生改变,其损伤后刚度矩阵为  $K_j^d$ ,则第  $j$  个构件的损伤可以利用式(2)来刻画,所有构件损伤因子的集合为  $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}^T$ 。 $\omega(\mu)$  为结构的频率,  $\omega(\mu) = \{\omega_1(\mu), \omega_2(\mu), \dots, \omega_m(\mu)\}^T$  为整体结构的  $m$  个频率。第  $i$  个频率  $\omega_i$  关于第  $j$  个构件的灵敏度计算公式为式(3),式中  $\varphi_i$  为第  $i$  阶质量归一化振型。这里定义第  $j$  个构件为  $D_j$ ,那么在构件  $D_j$  的布置虚拟支座后的结构称为虚拟结构  $G_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 。 $\tilde{\omega}^{(j)}(\mu)$  为虚拟结构  $G_j$  挑选出来的  $m_j$  个对构件  $D_j$  的损伤灵敏度高的频率的集合,其中  $\tilde{\omega}^{(j)}(\mu) = \{\tilde{\omega}_1^{(j)}(\mu), \tilde{\omega}_2^{(j)}(\mu), \dots, \tilde{\omega}_{m_j}^{(j)}(\mu)\}^T$ 。

$$K_j^d = \mu_j K_j \quad (2)$$

$$\omega_i^{(j)} = \frac{\partial \omega_i}{\partial \mu_j} = \frac{\varphi_i^T K_j \varphi_i}{2\omega_i} \quad (3)$$

设初始理论模型的损伤因子  $\mu_0 = \{\mu_{1,0}, \mu_{2,0}, \dots, \mu_{n,0}\}^T$ 。由 Taylor 级数可将  $\tilde{\omega}_k^{(j)}(\mu)$  展开为如下的近似表达式:

$$\tilde{\omega}_k^{(j)}(\mu) \approx \tilde{\omega}_k^{(j)}(\mu_0) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \tilde{\omega}_k^{(j)}(\mu_0)}{\partial \mu_i} \Delta \mu_i \quad (4)$$

其中:  $\Delta \mu_i = \mu_i - \mu_{i,0} (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

设  $\tilde{\omega}_{k,i}^{(j)} = \frac{\partial \tilde{\omega}_k^{(j)}}{\partial \mu_i}$ ,  $\Delta \tilde{\omega}_k^{(j)} = \tilde{\omega}_k^{(j)}(\mu) - \tilde{\omega}_k^{(j)}(\mu_0)$ ,则由式(4)有:

$$R^{(j)} \Delta \mu = \Delta \tilde{\omega}^{(j)} \quad (5)$$

式中:

$$R^{(j)} = \begin{bmatrix} \tilde{\omega}_{1,1}^{(j)} & \tilde{\omega}_{1,2}^{(j)} & \dots & \tilde{\omega}_{1,n}^{(j)} \\ \tilde{\omega}_{2,1}^{(j)} & \tilde{\omega}_{2,2}^{(j)} & \dots & \tilde{\omega}_{2,n}^{(j)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\omega}_{m_j,1}^{(j)} & \tilde{\omega}_{m_j,2}^{(j)} & \dots & \tilde{\omega}_{m_j,n}^{(j)} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \tilde{\omega}^{(j)} = \{\Delta \tilde{\omega}_1^{(j)} \quad \Delta \tilde{\omega}_2^{(j)} \quad \dots \quad \Delta \tilde{\omega}_{m_j}^{(j)}\}^T$$

若将所有虚拟结构  $G_j (j = 1, \dots, n)$  中挑选出来的频率都写成式(5)的形式,然后将所有这些表达式排列在一起为:

$$R \Delta \mu = \Delta \tilde{\omega} \quad (6)$$

式中:

$$R = \{(R^{(1)})^T \quad (R^{(2)})^T \quad \dots \quad (R^{(n)})^T\}^T$$

$$\Delta \tilde{\omega} = \{(\Delta \tilde{\omega}^{(1)})^T \quad (\Delta \tilde{\omega}^{(2)})^T \quad \dots \quad (\Delta \tilde{\omega}^{(n)})^T\}^T$$

所以损伤因子的可由式(7)进行迭代求出。

$$\mu = \mu_0 + R^+ \Delta \tilde{\omega} \quad (7)$$

2.2 操作步骤

将结构的构件进行分组,在每组各个构件上布置传感器,每组构件的选取和传感器的布置原则如下:

(1) 首先根据灵敏度分析,确定虚拟支座的位置,一般是布置在构件的中间位置;

(2) 传感器的布置要尽量与虚拟支座的位置一致,这样可以实现将每个传感器都可以转化为虚拟支座,可以减少测试的次数,降低试验成本;

(3) 传感器的优化的布置一般要求传感器尽量分散布置,这样可以捕捉到更多的结构模态信息。因为传感器的布置要尽量与虚拟支座的位置一致,所以每组构件的选取也分散。

分别对每组构件进行试验,利用测量的动力响应由约束子结构方法分别在构件上附加虚拟支座,并由构造的响应识别出虚拟结构的频率,最后联合所有挑选频率和对应虚拟结构的有限元模型,由灵敏度矩阵采用梯度迭代的方法对损伤进行优化识别。详细流程图见图1。

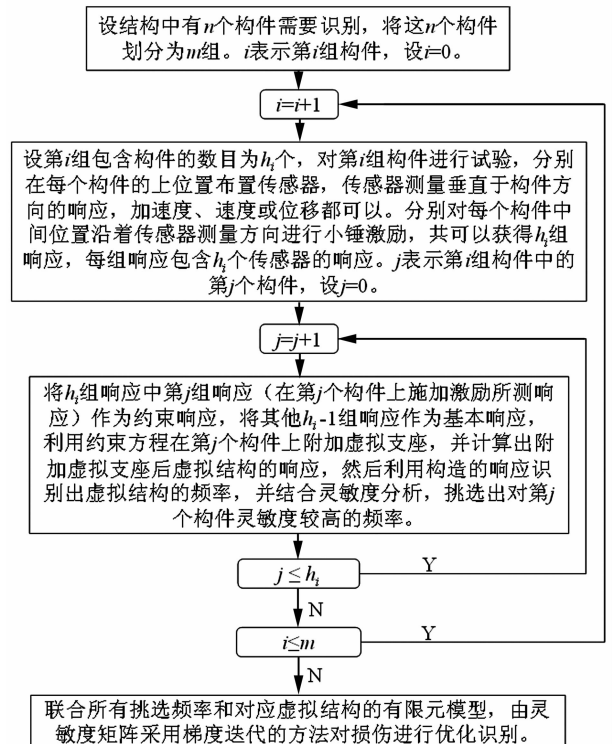


图1 流程图

Fig. 1 The flow chart

3 数值模拟

3.1 空间框架模型

三层空间框架有限元模型,如图2,每个梁和柱都划分为4个单元,每个板对应划分16个单元。层高3.6 m,横向两跨,每跨3.9 m,纵向一跨4.2 m,柱子截面0.4 m × 0.4 m,板的厚度0.12 m,梁的截面0.4 m × 0.2 m。结构的弹性模量0.345 GPa,密度2 600 kg/m<sup>3</sup>,结构的前两阶阻尼为0.01。

假设框架结构中只有柱损伤,其中 7 个柱发生损伤,损伤柱的编号为 2、3、6、8、10、11 和 15,各柱损伤后刚度为原未损伤时刚度的 70%、80%、50%、50%、70%、60% 和 70%,其具体损伤因子见图 3,损伤前后结

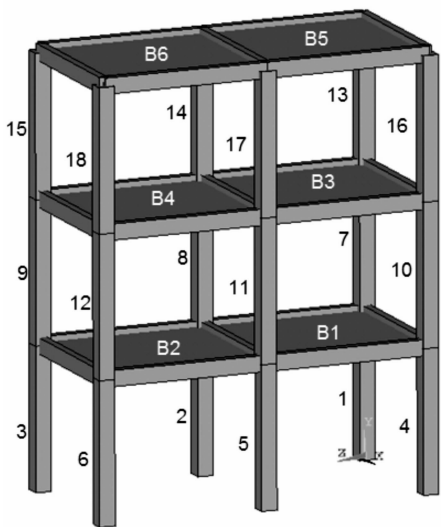


图 2 框架  
Fig. 2 The frame model

构的前 10 阶模态见表 1。假设损伤的位置和程度均未知,所以所有 18 个柱的损伤因子都需要识别,当识别出的损伤因子为 1 时表示柱未损伤,当损伤因子小于 1 时柱损伤。下面先对柱进行灵敏度分析,然后利用含有 5% 的响应构造虚拟结构并由灵敏度矩阵通过梯度迭代的方式识别柱的损伤。

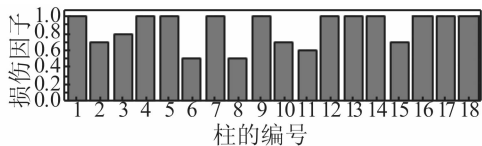


图 3 柱的损伤因子  
Fig. 3 Damage extents of pillar

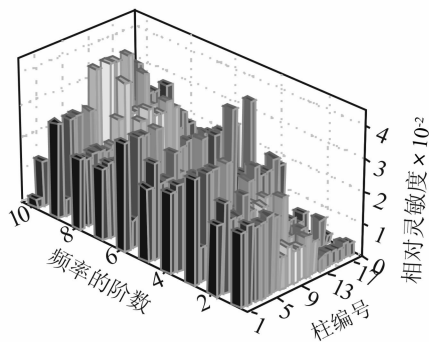


图 4 相对灵敏度  
Fig. 4 Relative sensitivity

3.3 损伤识别

先在柱 12 上布置虚拟支座为例,介绍利用结构的响应构造虚拟结构 G12,然后联合所有虚拟结构识别所有柱的损伤。实际工程中,噪声的影响和模态识别的误差是不可避免的,本小节利用含 5% 噪声的整体

表 1 结构的频率

Tab. 1 The natural frequencies of structure /Hz

阶数	未损伤	损伤	阶数	未损伤	损伤
1	2.92	2.76	6	12.78	12.18
2	3.03	2.85	7	18.76	17.12
3	3.89	3.69	8	18.82	17.15
4	9.96	9.39	9	23.57	22.05
5	10.17	9.68	10	24.06	22.11

3.2 柱的灵敏度分析

利用未加虚拟支座的原始有限元模型,进行前 10 阶频率的灵敏度分析,其相对灵敏度矩阵见图 4,矩阵中灵敏度的数值很小而且很接近,可以看出各个柱的损伤对各阶频率影响较小且相互之间相关性很强,这说明矩阵具有较强奇异性,很难准确识别损伤。

如图 5 在柱 12 上附加虚拟支座,注意图 5 中虚拟支座为虚拟的铰支座,只限制垂直于构件方法的一个方向的位移,对转角并不约束。计算附加虚拟支座后虚拟结构 G12 的灵敏度,如图 6,可以看出虚拟结构 G12 的第三阶和第八阶频率关于柱 12 的灵敏度大于其他柱的灵敏度很多,那么提取这两阶模态和对应的灵敏度。同理找到虚拟结构 G1 ~ G18 所有这样灵敏度高的频率,把这些频率收集在一起,一共 36 个频率,见表 2,利用 36 个频率识别 18 个柱子的损伤,已知的条件数大于未知数,理论上是可行的。将所有这些频率对应虚拟结构的灵敏度依次排列在一起成为一个矩阵,其数值见图 7,图中的灵敏度矩阵为对角元素占优的矩阵,所以可以直接利用最小二乘的方法简单和快速求解式(6)线性方程组,见式(8)。

$$\Delta\mu = (R^T R)^{-1} R^T \Delta\tilde{\omega} \quad (8)$$

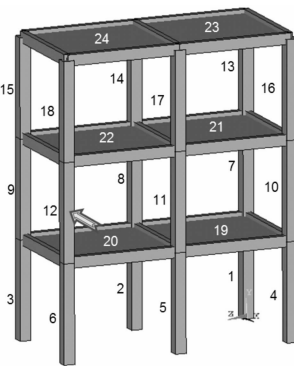


图 5 在柱 12 上施加虚拟支座(虚拟结构 G12)  
Fig. 5 Adding virtual support on pillar 12 (virtual structure(G12))

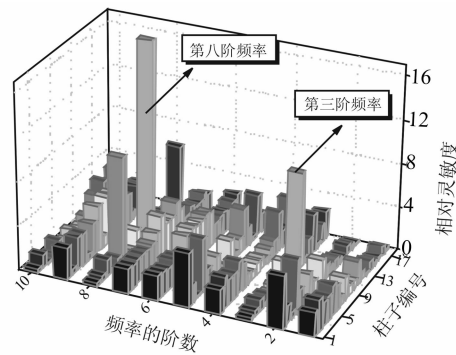


图 6 虚拟结构 G12 的相对灵敏度  
Fig. 6 The relative sensitivity of virtual structure G12

结构响应方法进行验证。

3.3.1 虚拟结构 G12 的构造

分别在柱 10、12 和 17 的中间布置加速度传感器,记为 S1、S2 和 S3,见图 8。用图 9 来模拟小锤激励,分别激励在 S1 和 S2 的位置,所得的含 5% 噪声的加速度

响应为图 10。采样频率 500 Hz,采样的总时间为 1 s。

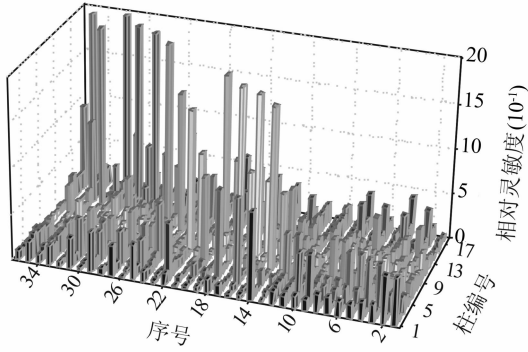


图 7 相对灵敏度的矩阵

Fig. 7 The matrix of selected relative sensitivity

表 2 选取的频率

Tab. 2 The selected natural frequencies

编号	阶数	未损/ Hz	损伤/ Hz	编号	阶数	未损/ Hz	损伤/ Hz
G1	3	4.19	3.98	G10	3	6.25	5.9
	6	13.87	13.39		8	20.11	18.63
G2	2	3.16	2.99	G11	3	4.89	4.49
	5	10.82	10.14		6	14.12	12.78
G3	3	4.19	4	G12	3	6.25	6.05
	6	13.87	13.22		8	20.11	18.77
G4	3	4.19	4	G13	5	12.2	11.63
	6	13.87	13.35		6	14.72	14.37
G5	2	3.16	3.03	G14	3	8.98	8.49
	5	10.82	10.3		5	10.33	9.93
G6	3	4.19	3.93	G15	5	12.2	11.35
	6	13.87	12.99		6	14.72	13.59
G7	3	6.25	6.05	G16	5	12.2	11.59
	8	20.11	19.73		6	14.72	14.44
G8	3	4.89	4.38	G17	3	8.98	8.5
	6	14.12	12.41		5	10.33	9.94
G9	3	6.25	6.04	G18	5	12.2	11.64
	8	20.11	19		6	14.72	14.24

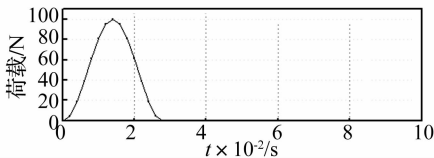
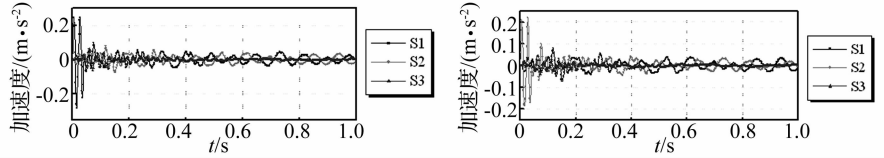


图 9 小锤激励

Fig. 9 Hammer excitation



(a) 在 S1 施加激励的响应

(b) 在 S2 上施加激励的响应

图 10 含 5% 噪声结构的响应

Fig. 10 The 5% noise polluted response

估计或挑选。根据上面两个步骤,并结合灵敏度分析,可确定表 3 中虚拟结构 G12 对柱 12 灵敏度高的频率为 5.92 Hz 和 19.19 Hz。

3.3.2 联合虚拟结构进行损伤识别

利用图 8 中传感器相同的布置,如果将在柱 17 上

选取 S1 激励所得响应为基本响应,S2 点激励的响应为约束响应,将两者代入约束方程可以构造出虚拟结构 G12,即把柱 12 的加速度传感器 S2 构造为虚拟支座,如图 11,对应构造的 S1 和 S3 的响应见图 12,与直接由损伤虚拟结构 G12

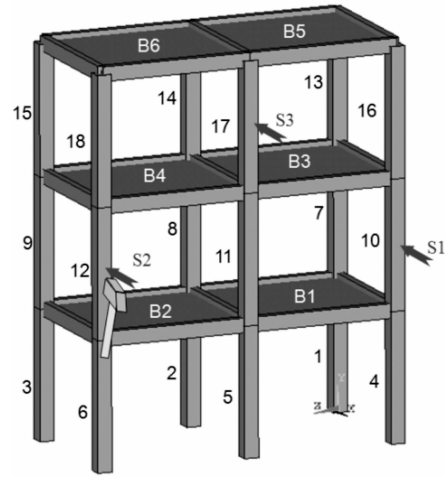


图 8 传感器布置与激励

Fig. 8 Sensors placement and hammer excitation on pillar 12

的有限元模型计算响应一致,验证了方法的准确性。利用图 12 构造的响应,识别虚拟结构 G12 的 8 个频率,见表 3。

表 3 识别虚拟结构 G12 的频率/Hz

Tab. 3 Identified natural frequencies of G12/Hz

序号	1	2	3	4
频率	3.00	5.92	10.21	19.19
序号	5	6	7	8
频率	24.43	39.21	41.76	45.66

由于激励的形式和作用点的限制,有些低阶模态并不能被激发出来。为了准确在表 3 中挑选出灵敏度较高的频率,并与结构模态的阶数相匹配,需要结合理论结构有限元模型进行分析:① 利用理论虚拟结构 G12 分析在小锤激励下可被激励的模态和对应的阶数;② 结合表 2 中所列的理论虚拟结构 G12 模型的频率与表 3 识别的频率进行比较,从识别的频率中进行

感器,则可以构造出 3 个虚拟结构,利用这三个传感器通过 6 种布置方式,就可以实现构造出所有柱所对应的虚拟结构 G1 ~ G18,这些所有识别的灵敏度高的频率集合见表 4。

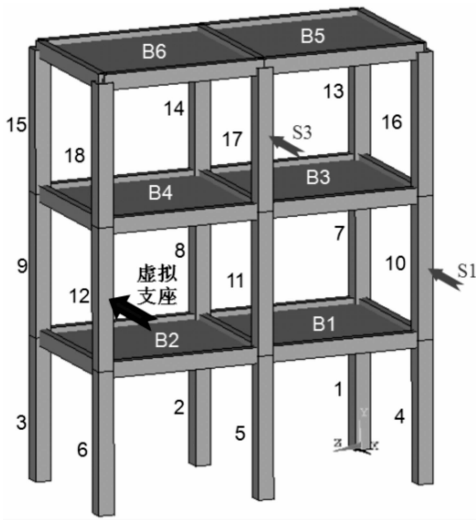


图 11 虚拟结构 G12

Fig. 11 Isolated structure G12

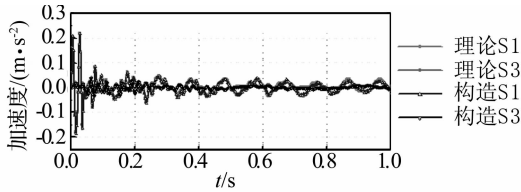


图 12 虚拟结构 G12 的响应

Fig. 12 The responses of virtual structure G12

表 4 挑选出的频率/Hz

Tab. 4 The selected identified natural frequencies/Hz

结构	频率	结构	频率	结构	频率
G1	4.02	G7	5.95	G13	11.49
	13.36		19.80		15.04
G2	2.93	G8	4.61	G14	8.50
	10.14		11.81		10.07
G3	4.27	G9	6.01	G15	11.45
	13.14		19.15		13.84
G4	4.00	G10	6.11	G16	11.57
	13.33		17.94		14.41
G5	2.95	G11	4.39	G17	8.51
	10.30		12.82		10.07
G6	4.03	G12	5.92	G18	11.62
	13.00		19.19		14.13

利用表 4 的识别的 36 个频率,联合 18 个虚拟结构 G1 ~ G18 进行,优化迭代 5 次识别出柱的 18 个损伤因子,见图 13,由结果可以看出,第二三层的 12 根柱子识别的较准确,而第一层的六个柱子中有三根误差比较大。导致底层柱识别误差的主要原因是由于其一端本身已经是固结,所以附加的虚拟支座对其灵敏度增加的不明显,由图 7 也能看出,相对其他柱,底层柱的相对灵敏度较低。

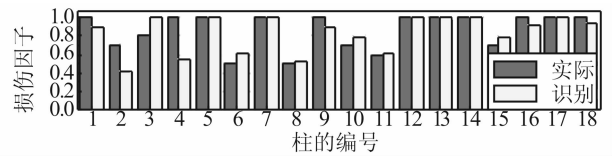


图 13 识别的损伤因子

Fig. 13 Identified damage extents

这里借助底层柱已经存在一个固定支座的特点,在柱子的另一个边界附加虚拟支座,如图 14(a),两个支座虽然不能将底层柱完全分离出整体,但可以使底层柱具有较强的局部动态特性,削弱整体结构对底层柱的影响,使其在局部激励作用下主要以一阶局部模态振动,这阶模态对应的频率为局部主频率<sup>[11]</sup>,局部主频率关于其构件具有很高的灵敏度。如图 14(a) 布置两个加速度传感器 S1 和 S2,分别沿两个传感器方向进行激励。将 S1 转化为虚拟支座,可构造出图 14(b) 附加虚拟支座后的响应,见图 15。利用构造的响应识别出对应的局部主频率。分别在底层柱上附加虚拟支座,对应的 6 个柱的局部主频率见表 5。

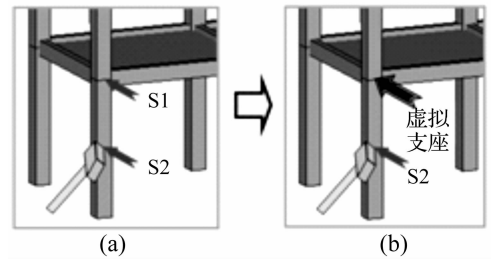


图 14 虚拟支座

Fig. 14 Virtual support

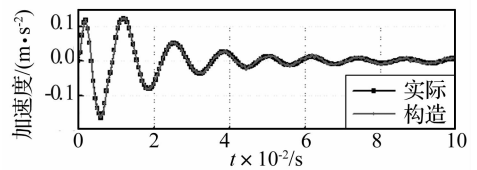


图 15 构造的响应

Fig. 15 The constructed responses of the structure with virtual support

表 5 局部主频率/Hz

Tab. 5 The Identified local primary frequency /Hz

编号	1	2	3	4	5	6
损伤因子	1	0.7	0.8	1	1	0.5
理论损伤	111.08	88.03	101.42	106.22	104.61	75.62
识别	109.07	88.13	99.32	105.40	104.11	75.35

联合表 4 和表 5 共 42 个频率识别柱的损伤,可以很准确地识别出损伤因子,结果见图 16,验证了方法的有效性。

Techniques; Advances and Applications [C]. Proc. SPIE, 1998, 3411:224-235.

- [7] Link A, Täubner A, Wabinski W, et al. Modelling accelerometers for transient signals using calibration measurements upon sinusoidal excitation[J]. Measurement, 2007, 40:928-935.
- [8] Elster C, Link A, Bruns T. Analysis of dynamic measurements and determination of time-dependent measurement uncertainty using a second-order model [J]. Meas. Sci. Technol., 2007, 18:3682-3687.
- [9] 胡红波, 于 梅. 基于高冲击激励的加速度计参数识别的研究 [J]. 传感技术学报, 2012, 25(4):487-490.  
HU Hong-bo, YU Mei. Study for parameters identification of an accelerometer based on high shock intensities[J]. Chinese

Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(4):487-490.

- [10] Link A, von Martens H J. Accelerometer identification using shock excitation[J]. Measurement, 2004, 35:191-199.
- [11] Link A, Täubner A, Wabinski W, et al. Calibration of accelerometers; determination of amplitude and phase response upon shock excitation [J]. Meas. Sci. Technol., 2006, 17:1888-1894.
- [12] Ueda K, Umeda A, Imai H. Uncertainty evaluation of a primary shock calibration method for accelerometers [J]. Metrologia, 2000, 37:187-197.
- [13] von Martens H J. Evaluation of uncertainty in measurements-problems and tools [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 38:185-206.

(上接第 123 页)

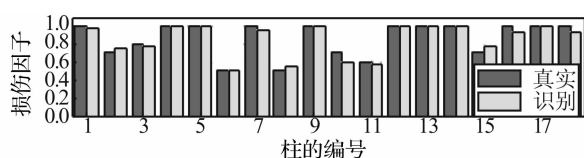


图 16 最终识别的损伤因子

Fig. 16 The final identified damage extents

## 4 结 论

本文提出基于虚拟支座的损伤识别方法, 利用以三层空间框架模型准确的识别了柱的损伤, 并得到以下主要结论:

(1) 在每个构件上都布置虚拟支座, 不但提高了模态对局部损伤的灵敏性, 而且增加识别模态的数据量, 进而提高了损伤识别的精度和计算效率。

(2) 通过少数传感器的排列组合布置, 就可以实现整体结构的损伤识别, 降低了试验的成本。

该方法要求整体结构为线性结构, 该局限需进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] Peeters B, Roeck G. Reference-based stochastic subspace identification for output only modal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999(13):855-878.
- [2] Bazan F S V. Eigensystem realization algorithm (ERA): reformulation and system pole perturbation analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 274 (1-2): 433-444.
- [3] Wang J, Ko J, Ni Y. Modal sensitivity analysis of tsing ma bridges for structural damage detection [A]. Aktan A E, et al. SPIE 5th Int. Symposium on Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aging Infrastructure. Newport Beach, 2000:300-311.
- [4] 赵建华, 张 陵, 相秉志, 等. 一种不完备测试数据下的结构损伤识别方法 [J]. 应用力学学报, 2010 (4): 670-673.

ZHAO Jian-hua, ZHANG ling, XIANG Bing-zhi, et al. A method for structural damage identification based on incomplete measured data [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics. 2010(4): 670-673.

- [5] 韩东颖, 时培明. 基于频率和当量损伤系数的井架钢结构损伤识别 [J]. 工程力学 2011(9): 109-114.  
HAN Dong-ying, SHI Pei-ming. Damage identification of derrick steel structures based on frequency and equivalent damage coefficient [J]. Engineering Mechanics, 2011(9): 109-114.
- [6] 施 洲, 赵人达. 基于模态参数考虑边界条件变异的桥梁结构损伤识别 [J]. 应用力学学报, 2012(2): 191-196.  
SHI Zhou, ZHAO Ren-da. Damage detection of bridge structure accounting for boundary condition variation based on mode parameters [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2012(2): 191-196.
- [7] 杨秋伟, 刘济科. 结构损伤识别的附加质量方法 [J]. 工程力学, 2009, 26(5): 159-163.  
YANG Qiu-wei, LIU Ji-ke. Structural damage identification by adding given masses [J]. Engineering Mechanics. 2009, 26(5): 159-163.
- [8] 杨智春, 王 乐, 丁 燕, 等. 基于附加已知刚度的动力学模型修正方法 [J]. 工程力学, 2009(5): 19-24.  
YANG Zhi-chun, WANG Le, DING Yan, et al. A direct model updating method using added known stiffness [J]. Engineering Mechanics, 2009(5): 19-24.
- [9] Hou J, Jankowski L, Ou J. Experimental study of the substructure isolation method for local health monitoring [J]. Structural Control & Health Monitoring, 2012 (2): 191-196.
- [10] Kolakowski P, Wiklo M, Holnicki-Szulc J. The virtual distortion method-a versatile reanalysis tool for structure and systems [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2008, 36(3):217-234.
- [11] Hou J, Jankowski L, Ou J. Substructural damage identification using Local Primary Frequency [C]. The 11th International Symposium on Structural Engineering. Dec. 18-20, 2010, Shenzhen, Guangzhou, China.