

文章编号: 1000-4750(2013)04-0129-07

约束子结构损伤识别的时序方法研究与试验

侯吉林¹, 欧进萍^{1,2}, Łukasz Jankowski³

(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: 针对大型复杂结构的整体监测常常面临测量信息不足等困难, 提出只利用局部动态响应进行子结构损伤识别的约束子结构方法。约束子结构方法是通过子结构响应的卷积组合限制子结构边界的响应为零, 来实现施加虚拟支座, 从而将子结构分离出整体, 然后利用构造的相应子结构内部响应, 进行子结构损伤识别。该文利用先分段提取结构响应的子时间序列, 再延时排列 Toeplitz 矩阵的方式, 使基于不同响应的构造约束子结构的方程具有相同表达式, 统一了约束子结构方法的基本思想。通过测量悬臂梁的局部动力响应, 利用局部响应的时间序列实现了子结构的快速准确地分离和识别, 验证了方法的实用性和有效性。

关键词: 结构健康监测; 损伤识别; 子结构; 时间序列; 脉冲响应

中图分类号: TU311.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.10.0722

THE EXPERIMENT OF SUBSTRUCTURE ISOLATION AND IDENTIFICATION USING LOCAL TIME SERIES

HOU Ji-lin¹, OU Jin-ping^{1,2}, Łukasz JANKOWSKI³

(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: For huge complex structures, it is difficult to obtain enough information which is required necessarily in their global monitoring. Aiming at this problem, a Substructure Isolation Method (SIM) is proposed for local damage identification. An isolated substructure is a virtual and independent structure, which is separated from a global structure by adding virtual supports on the substructure boundary to zero the substructure boundary responses. Correspondingly the interior responses of the isolated substructure are constructed and used to identify the local substructure damage equivalently. In order to reveal the essence of the Substructure Isolation Method and unify its basic concept, the way of arranging sub-time series is improved according to the SIM method based on impulse response, that is, sub-time series are extracted section by section, and then are arrayed into a Toeplitz matrix. In this way, it not only unifies the expression of SIM based on local time series and that based on impulse response, but also integrates the basic concept of SIM. An experiment of a cantilever beam is used to validate the efficiency and the practical application of this method. Both the substructure isolation and damage identification are performed successfully using local measured responses.

Key words: structure health monitoring; damage identification; substructure; time series; impulse response

收稿日期: 2011-10-28; 修改日期: 2012-03-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(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); 中国博士后科学基金项目(20110490142); 住房和城乡建设部项目(K2201243)

通讯作者: 侯吉林(1979), 男(满), 吉林人, 博士, 主要从事结构健康检测研究(E-mail: hou.jilin@hotmail.com).

作者简介: 欧进萍(1959), 男, 湖南人, 教授, 博士, 博导, 院士, 主要从事结构振动控制、健康监测等研究(E-mail: oujinp@dlut.edu.cn);

Łukasz Jankowski(1975), 男, 波兰人, 助教, 博士, 主要从事结构健康监测研究(E-mail: lukasz.jankowski@ippt.gov.pl).

结构健康监测是土木工程中的研究热点^[1], 损伤识别是结构健康监测的重要理论基础部分, 为结构的监测、预警和安全评定提供可靠的理论依据。随着土木工程中结构不断向大型性和复杂性发展, 加上测试信息中不可避免的误差性和有限性, 使得对复杂结构整体进行准确的损伤识别越来越困难。而子结构方法只需利用局部的动态信息来修正局部构件或子结构, 在一定程度上可以克服上述困难。

现有的文献多数将子结构从整体中分离出来进行分析, 考虑二者之间的相互作用力。Reich 和 Park^[2-3]把整体柔度分解成多个子结构的局部柔度或单元柔度, 再由子结构柔度的变化定位损伤。Yun 等^[4]考虑整体结构对其边界的作用力, 利用滑动自平均的方法估计子结构的参数, 包括子结构的刚度修正系数、瑞利阻尼系数和卡尔曼滤波系数。Koh 等^[5]利用频响函数识别悬臂梁的子结构弹性模量。Yang^[6]利用连续非线性最小二乘法估计子结构的加速度、速度和位移以及刚度和阻尼等参数, 同时估计整体结构对子结构边界的作用力, 这种方法可以有效地追踪结构损伤随时间的变化。樊素英等^[7]应用广义卡尔曼滤波, 可得到该两相邻单元的质量、刚度和阻尼等物理参数。谢献忠等^[8]结合子结构技术与分解算法或统计平均算法, 在有限测点条件下进行结构参数识别及荷载反演。郭力等^[9]提出了多重子步模型修正方法(MSMUM), 先进行误差定位, 再实现参数修正, 把复杂的模型修正过程分步实现, 利用该方法对润扬大桥南汉悬索桥桥塔模型进行了修正。

刚度直接反应结构损伤状态, 所以往往刚度信息是最受关注的, 此时只需要识别刚度的参数即可。然而上述文献多数是根据子结构的运动方程来估计, 而方程中涉及的参数包括子结构的刚度、质量、阻尼或者边界荷载等参数, 只要是未知参数都需要参与优化, 因此这类方法在某种程度上增加了需识别的未知数, 增大了计算量, 降低了收敛的速度。

欧进萍等提出约束子结构方法, 分别利用局部的脉冲响应^[10-11]和时间序列^[12]构造独立的虚拟的约束子结构模型, 实现将子结构从整体中分离出来, 然后借用针对整体模型的经典成熟方法进行子结构刚度的损伤识别, 避免了一般子结构方法需要估计子结构边界作用的限制, 降低了优化参数, 提高了优化效率, 操作简单。约束子结构是指在子结构边界上添加虚拟支座, 从整体中分离出来的虚拟独立

的结构, 易于分析和识别。

文献[10]利用结构理想脉冲响应理论推导了约束子结构方法。文献[11]在文献[10]的基础上对方法应用范围进行扩展, 包括激励的形式、虚拟支座的类型以及结构类型等, 使该方法适合在实际结构中应用。文献[10]和文献[11]中都需要结构响应的初始状态为零, 而文献[12]基于时间序列的方法则对结构的初始状态没有限制。本文结合基于脉冲响应^[10-11]和时间序列^[12]的理论推导过程, 统一构造约束子结构的表达式——约束方程, 揭示方法的本质, 便于理解和应用约束子结构方法, 最后通过悬臂梁试验验证方法的有效性。

1 约束子结构方法

下面首先给出构造约束子结构的统一表达式——约束方程, 然后结合脉冲响应和时间序列响应介绍约束方程中各约束矩阵的物理意义。

1.1 约束方程

文献[10]利用结构理想脉冲响应理论推导了构造约束子结构的方程, 见式(1), 这里称其为约束方程。本文在此基础上, 结合文献[11]中约束子结构方法的扩展和文献[12]中基于时间序列的方法, 推导统一了构造约束子结构的约束方程, 即:

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

其中: D_s 为构造的约束子结构的响应; 矩阵 A 和矩阵 C 为约束响应矩阵, 分别是由相关子结构边界和内部响应构造的分块等对角线矩阵, 主要用于约束和限制子结构边界的响应; A^+ 表示 A 的广义逆; B 和 D 也分别是由子结构边界和内部的响应排列成的矩阵, 其用途是获得子结构基本的动力响应, 反映子结构的基本动态信息, 定义为“基本响应矩阵”。

下面结合脉冲响应和时间序列响应来揭示约束方程中各矩阵的物理意义。

1.2 基于脉冲响应的约束子结构方法

文献[10]对脉冲响应的约束子结构方法进行了细致地推导, 这里不再赘述, 下面重点介绍相应的构造约束子结构的统一的约束方程中各个矩阵的构造过程, 为基于时间序列的方法进行铺垫。

假设子结构的边界上存在 n 个自由度, 则需要子结构边界布置 n 个传感器; 另外, 在子结构内部布置 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”, 因为子结构的边界上含有 n 个自由度, 所以需要在子结构的边界或者

外部施加 n 组不同激励。这里“不同激励”是指激励的位置或方向不同。令在第 i 组脉冲激励下，对应整体结构中子结构边界的第 j 个传感器的脉冲响应为 a_{ji} 、子结构内部第 k 个传感器的脉冲响应为 c_{ki} ，定义这些响应为“约束响应”。测量约束响应在方法中主要是用来限制子结构的边界响应。若 w 为采样的时刻数，则 a_{ji} 和 c_{ki} 均为 w 维的列向量。把约束响应 a_{ji} 和 c_{ki} ($i, j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, l$) 分别排列为脉冲响应矩阵 A 和矩阵 C ，称 A 和 C 为“约束响应矩阵”，其中 $A=[A_{ji}]$ ， $C=[C_{ki}]$ ， A 为 nw 维的方阵， C 为 lw 行 nw 列的矩阵， A_{ji} 和 C_{ki} 均为 w 维的方阵，为脉冲响应矩阵。分块脉冲响应矩阵 A_{ji} 的构造方式见图 1，即把脉冲响应 a_{ji} 进行延时排列而得到。所以，约束响应矩阵为 Toeplitz 矩阵组成的分块矩阵。同理，矩阵 C 也可以构造出来。

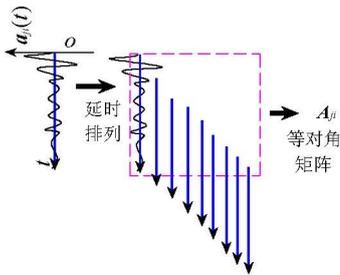


图 1 脉冲响应矩阵

Fig.1 Impulse responses matrix

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 ，令在 f_j 的激励下，整体结构对应子结构位置边界上 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”。 b_j 和 d_j 分别为对应边界和内部所有传感器测量的响应根据传感器的编号顺序排列而成的列向量，分别为 nw 和 lw 维的列向量。由基本响应 b_j 和 d_j 构造的矩阵 $B=[b_1, b_2, \dots, b_m]$ 和 $D=[d_1, d_2, \dots, d_m]$ 为“基本响应矩阵”，其中 B 为 nw 行 m 列的矩阵， D 为 lw 行 m 列的矩阵。基本响应矩阵主要是为了获得反映子结构的基本动态特性的信息。

将矩阵 A 、 B 、 C 和 D 代入约束方程式(1)，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 $d_{s,j}$ 为等价于虚拟的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，所排列出来的列向量。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。

1.3 基于时间序列的约束子结构方法

文献[12]把整体结构对应子结构位置一组响应的时序序列划分为若干组子时序序列，然后由这些子时序序列的线性组合构造约束子结构的自由响应。本文为了使基于时序序列与基于脉冲响应的方法具有一致的表达式，而且使约束子结构方法的基本思想和理论推导更为严谨和统一，对文献[12]的响应提取方法进行改进，具体如下。

在子结构外部进行激励，对激励的具体形式没有严格的要求，可以是随机荷载，也可以随意敲击。设列向量 $x_i(t)$ 为子结构边界上第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 个传感器的响应， $X(t)=[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ 代表子结构边界 n 个传感器响应的集合；设列向量 $y_j(t)$ 为子结构内部第 j ($j=1, 2, \dots, l$) 个传感器的响应， $Y(t)=[y_1(t), y_2(t), \dots, y_l(t)]^T$ 代表子结构内部 l 个传感器响应的集合。

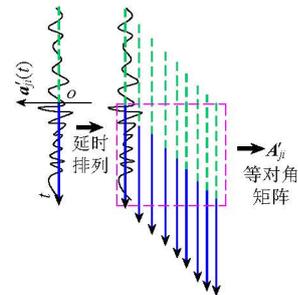


图 2 约束矩阵中分块矩阵的构造方法

Fig.2 The construction method of block matrix in constraining matrix

假设要构造约束子结构的自由响应的长度为 w ，则在测量响应的时序序列 $[\dots, X(t_{i-1}), X(t_i), X(t_{i+1}), \dots]$ 和 $[\dots, Y(t_{i-1}), Y(t_i), Y(t_{i+1}), \dots]$ 中随意选取 n 组长度为 $2w-1$ 不相同的子时序序列 X_{ci} 和 Y_{ci} ($i=1, 2, \dots, n$)，定义为“约束响应”， X_{ci} 和 Y_{ci} 分别为 n 行 $2w-1$ 列和 l 行 $2w-1$ 列的矩阵。为了将这 n 组子时序序列，在形式上与上一节中 n 组脉冲响应对应，进行如下处理：如果 a'_{ji} 为子结构边界的第 i 组约束响应 X_{ci} 中第 j (其中 $j=1, 2, \dots, n$) 个传感器的响应， a'_{ji} 为 $2w-1$ 维的向量，那么设第 w 时刻即响应的中间时刻作为时间坐标的零时刻，见图 2 左边，然后将 $a'_{ji}(0)$ 做为矩阵的第一行第一列，按照图 2 的方式延时向右错位排列，让 $a'_{ji}(0)$ 位于斜向下的对角线上，然后选取中间 w 维的方阵记为 A'_{ji} ，则 A'_{ji} 为 Toeplitz 矩阵。设 $A'=[A'_{ji}]$ ，则 A' 为约束响应矩阵，为 nw 维的方阵。同理利用 Y_{ci} 构造约束响应矩阵 C ，为 lw 行 nw 列的分块 Toeplitz 矩阵。比较图 1

和图 2, 可以看出分块矩阵 A_{ji} 和 A'_{ji} 的构造方式是一样的, 只是响应的类型不同。脉冲响应在零时刻之前的响应为 0, 也就是说需要在结构完全静止的前提下进行激励和测量; 而时间序列在零时刻之前的响应不是 0, 即对试验的初始状态没有限制。另外, 基于脉冲响应方法需对结构进行 n 组试验, 以测量 n 组不同脉冲响应; 而基于时间序列的方法只需在一组响应上进行分段提取子时间序列即可, 操作更方便更简单。

分别在响应的的时间序列 $[\dots, X(t_{i-1}), X(t_i), X(t_{i+1}), \dots]$ 和 $[\dots, Y(t_{i-1}), Y(t_i), Y(t_{i+1}), \dots]$ 中另选取 m 组 w 长度的子时间序列 X_{bj} 和 Y_{dj} (其中 $j=1, 2, \dots, m$), X_{bj} 和 Y_{dj} 分别为 n 行 w 列和 l 行 w 列的矩阵。分别将矩阵 X_{bj} 和 Y_{dj} 按照传感器编号顺序排列为列向量, 记为基本响应 b'_j 和 d'_j , b'_j 和 d'_j 分别为 nw 和 lw 维的列向量。则由 b'_j 和 d'_j 可排列为基本响应矩阵 B' 和 D' , 其中 B' 为 nw 行 m 列的矩阵, D' 为 lw 行 m 列的矩阵。

将矩阵 A' 、 B' 、 C' 和 D' 代入约束方程式(1)即可计算出约束子结构的响应矩阵 D'_s 。本文介绍的先分段提取子时间序列再延时排列矩阵的方法, 与文献[12]直接延时排列矩阵的方法本质上是一样的, 只是提取响应的方式略有不同, 因此利用约束方程计算出来的 D'_s 即为约束子结构响应, 其详细的证明过程这里不在赘述。

1.4 建立优化的目标函数

当子结构的内部不存在激励的作用, 则计算的矩阵为约束子结构的自由响应矩阵, 因此可构造自由响应识别约束子结构的模态, 进而进行子结构的损伤识别。本文建立如下的目标函数来优化识别损伤因子, 见下式:

$$\Delta = \sum_i \left\| \frac{\omega_i(\mu) - \omega_{i,m}}{\omega_{i,m}} \right\| \quad (2)$$

式中: ω_i 为理论约束子结构模型在给定损伤因子 μ 下的第 i 阶频率; $\omega_{i,m}$ 为由构造的约束子结构响应识别的其第 i 阶频率。以式(2)中 μ 为优化变量, 使 Δ 达到最小的 μ 值, 即为所要识别的子结构的损伤因子。

综上所述可以看出, 约束子结构方法的最重要的步骤是构造约束子结构的响应, 继而利用构造的响应识别子结构时, 则可以选择经典成熟的方法。

1.5 约束子结构的本质

这里通过先分段提取再延时排列的方法, 将基

于时间序列和脉冲响应的方法联系和统一起来。因为脉冲响应矩阵概念明确, 推导过程中力学意义鲜明^[10], 所以将两者联系起来, 并统一表达式, 不但便于理解, 而且也增加了约束子结构方法整体的严谨性。

结合两种方法可以看出, 约束方程的一般形式即为基于时间序列的约束子结构方法, 如果当所截选子时间序列的初始状态为零时, 则约束方程退化为基于脉冲响应的约束子结构方法。这两个方法的本质或基本思想是一致的: 利用子结构局部响应中“约束响应”的卷积组合限制其“基本响应”的边界响应, 使其子结构响应的线性组合其在一段时间内边界响应为零, 从而等价于在子结构边界上施加虚拟支座, 将子结构分离出来整体, 构造出虚拟独立的约束子结构的响应, 然后利用所构造的响应通过识别约束子结构等效识别子结构。

2 试验验证

本节通过悬臂梁的试验, 介绍方法中子时间序列的提取方式, 并验证约束子结构方法的有效性。

2.1 悬臂梁试验

试验装置如图 3(a)所示, 其中铝梁长 136.15cm, 截面为 2.7cm×0.31cm。梁的弹性模量为 70GPa, 密度是 2700kg/m³。

选取梁的上半部(见图 3(b), 长 79.4cm)为待识别的子结构。在子结构中部位置通过切割的办法模拟损伤, 见图 3(c)。为了验证约束子结构方法不受整体结构的限制, 这里选用 3 种整体结构模型, 见表 1。其中 B1 是悬臂梁模型; B2 是在悬臂梁上子结构的外部固定一集中质量, 见图 3(d); B3 是在悬

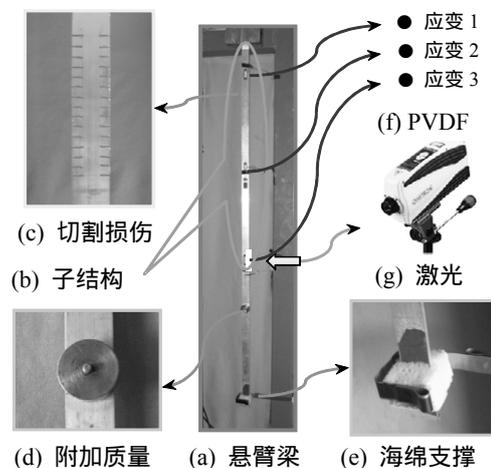


图 3 试验平台的搭建

Fig.3 Experimental setup

臂梁自由端添加含有海绵的支撑, 见图 3(e), 由于海绵比较软, 且阻尼比较大, 会给整体结构增加一定程度的非线性。

表 1 整体结构形式

Table 1 The styles of the global structure

结构编号	整体结构形式
B1	悬臂梁
B2	子结构外部附加集中质量
B3	自由端中添加海绵支撑

采用构造虚拟铰支座的方法隔离子结构, 忽略轴向变形, 位移边界上有 2 个自由度, 因此在子结构的边界布置一个 PVDF(图 3(f)中应变 3), 并用激光器(图 3(g))测量边界的速度。根据损伤识别的需要, 在子结构的内部布置两个 PVDF(图 3(f)中应变 1~应变 2)。传感器的布置及编号见表 2。

表 2 传感器布置与编号

Table 2 The sensor placements and numbering

位置	传感器	响应编号
子结构内部	应变 3	X1
	速度(激光)	X2
子结构边界	应变 1	Y1
	应变 2	Y2

本试验的目的是利用响应的时间序列将子结构边界的 2 个传感器应变和速度转化为虚拟铰支座, 将子结构从整体中分离出来, 如图 4, 构造出约束子结构的自由响应, 然后利用 ERA 方法识别其频率。建立约束子结构的有限元模型, 优化中, 为确定损伤的位置和程度, 将子结构划分为 5 个部分, 如图 4, 实际试验中第 2 个部分是损伤的。

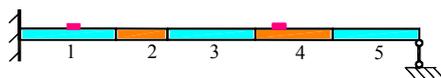


图 4 约束子结构划分为 5 部分

Fig.4 Division of the substructure into five segments

2.2 激励及响应

试验中, 用小锤在子结构的外部在时间和空间上进行杂乱无章的人工敲击。由于是手工操作, 会导致连续两次小锤敲击的时间间隔不可能很短, 为了使结构在单位时间内获得更多的小锤激励, 使其接近白噪声激励, 可以将若干组这样的响应进行叠加。这里对每组梁做 10 组无序敲击试验, 并对响应进行叠加, 叠加后三组结构响应的时间序列见图 5~图 7。

该试验不需要将传感器测量的电压信号转化为应变或速度, 因而不需要标定传感器, 有 2 个原因:

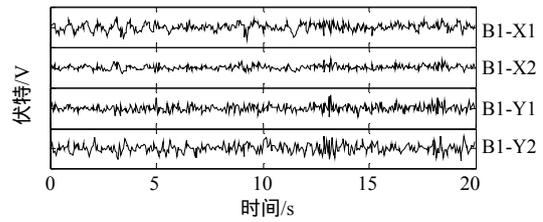


图 5 梁 B1 的无序敲击响应

Fig.5 The responses of B1 to disorder impact

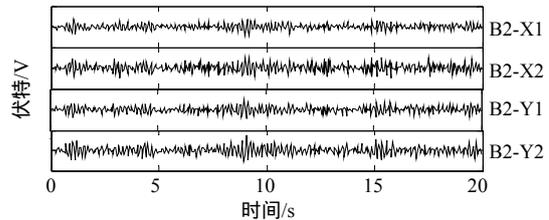


图 6 梁 B2(附加质量)的无序敲击响应

Fig.6 The responses of B2 to disorder impact (mass)

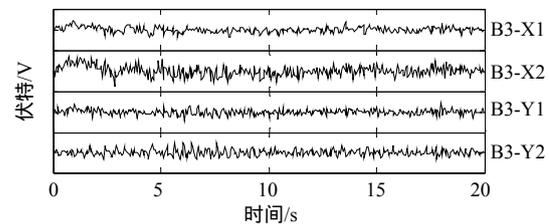


图 7 梁 B3(海绵支撑)的无序敲击响应

Fig.7 The responses of B3 to disorder impact(sponge support)

1) 文中只利用约束子结构的频率识别子结构的损伤, 没有用到振型, 因此不需要标定。另外子结构内部只有 2 个传感器, 也很难用其识别的振型进行损伤识别。

2) 试验中, 应变和激光器所测量的电压时程的幅值具有相同的数量级, 所以直接利用电压时程可避免运算过程中由于数据数量级差异带来的误差。

2.3 响应的提取

在激励的作用下, 整体结构对应子结构位置 2 个传感器的响应示意图见图 8, 和子结构内部 2 个传感器响应的示意图见图 9, 两幅图清晰地给出了响应的提取过程。由图 5 中测量的 B1 梁的响应, 分别按照图 8 和图 9 的方法提取约束响应 $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, c_{11}, c_{12}, c_{21}, c_{22}$, 基本响应 b_1, b_2, d_1, d_2 , 分别见图 10 和图 11。然后利用约束响应的延时排列, 按照图 2 构造对应的约束响应矩阵 $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}, C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}$, 利用基本响应构造基本响应矩阵 B_1, B_2, D_1, D_2 。由图 6 和图 7 所测量的 B2 梁和 B3 梁的响应按照同样的方法可以得到约束响应和基本响应, 与图 10 和图 11 类似, 这里不再一一给出。

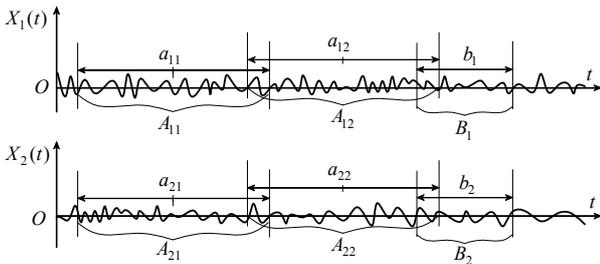


图 8 子结构内部传感器的响应

Fig.8 The interior time series of the substructure

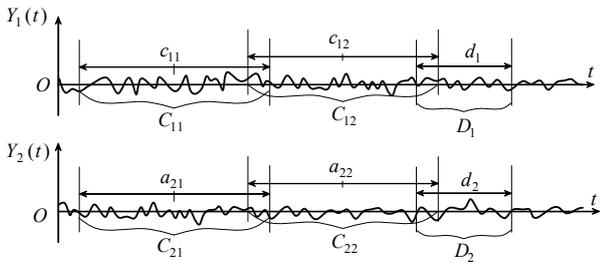
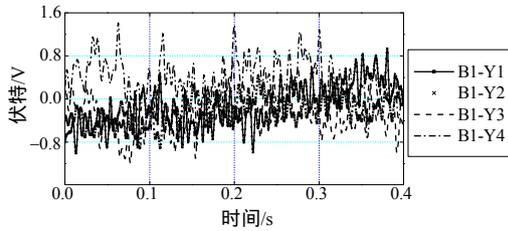
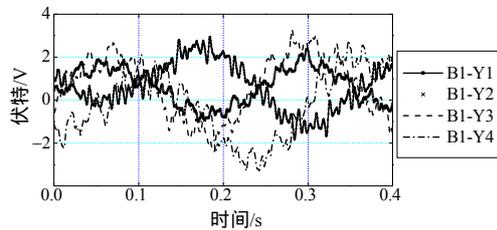


图 9 子结构外部的响应

Fig.9 The boundary time series of the substructure



(a) 第一组约束响应



(b) 第二组约束响应

图 10 梁 B1 的约束响应

Fig.10 The constraining responses of beam B1

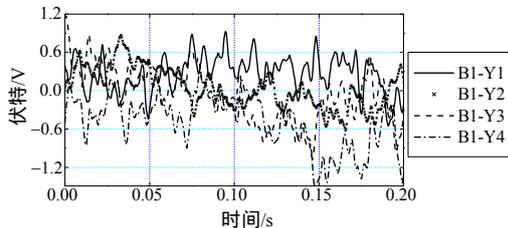


图 11 梁 B1 的基本响应

Fig.11 The basic responses of beam B1

2.4 构造约束子结构的自由响应

按照图 2 将约束响应构造为约束矩阵 A 、 B 、 C 和 D ，进而代入约束方程计算约束子结构的自由响

应，分别见图 12~图 14。基本响应的长度为 0.2s，构造的约束子结构的响应也为 0.2s，而这里只取前 0.12s。这是由于在计算的过程中发现，利用约束方程构造响应的尾部往往会有一小段响应是发散的，即振动幅值越来越大，这并不符合自由响应衰减规律。这种发散是由于本试验的约束响应矩阵为 Toeplitz 矩阵(图 2)，其性质与脉冲响应矩阵(图 1，下三角阵)相似，所以求逆(相当于反卷积运算)会造成误差累积(包括噪音误差和计算误差)，从而使尾部响应发散，构造的响应越长，尾部发散的现象越明显。所以这里只选用 0.2s 的响应进行计算，为了消除响应发散带来的误差影响，这里统一选取构造响应的前 0.12s 响应，而舍弃后面的 0.08s。

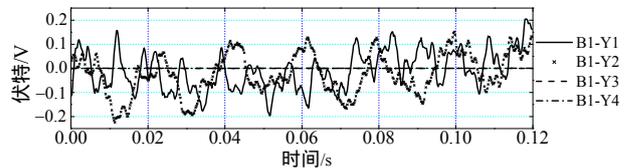


图 12 由梁 B1 构造的约束子结构的自由响应

Fig.12 The constructed free responses of isolated substructure using time series of beam B1

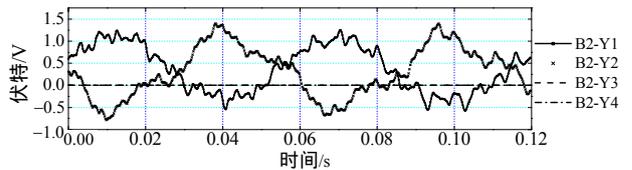


图 13 由梁 B2 构造的约束子结构的自由响应

Fig.13 The constructed free responses of isolated substructure using time series of beam B2

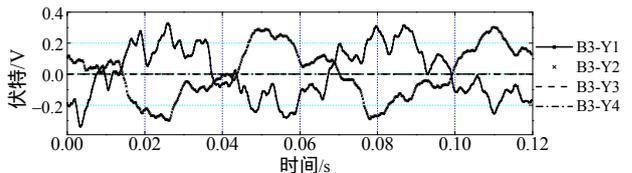


图 14 由梁 B3 构造的约束子结构的自由响应

Fig.14 The constructed free responses of isolated substructure using time series of beam B3

2.5 子结构的损伤识别

因为所构造的自由响应时间较短，所以利用时域的模态识别方法——ERA 方法来识别频率。由上面构造的 3 组自由响应识别约束子结构的频率，见表 3，可以看出理论损伤的约束子结构模型和由 3 组实测响应构造的约束子结构响应识别出来的频率基本上是一致的，验证了构造约束子结构方法的有效性。

表3 识别的频率 /Hz

Table 3 Identified natural frequencies

阶数	理论有限元模型		试验识别		
	完好	损伤	B1	B2	B3
1	17.68	17.52	17.53	17.40	17.27
2	57.33	52.01	51.66	51.70	52.44
3	119.15	112.95	112.56	112.91	112.74
4	203.30	195.66	193.58	195.64	194.74
5	310.47	290.04	290.33	289.69	290.91
6	439.95	413.93	415.05	413.79	413.77
7	592.48	551.07	547.62	549.81	553.40

由表3中识别的约束子结构的前7阶频率,利用目标函数式(2)可优化识别出图4中约束子结构的5个损伤因子。由于只对隔离出的子结构进行分析,结构比较小,识别的参数比较少,所以损伤因子很容易优化,见图15。可以看出利用3组整体结构的无序敲击响应都能很准确地识别子结构损伤的位置和程度,子结构外部的未知因素(附加质量和非线性海绵支撑)能够被有效地剔除。

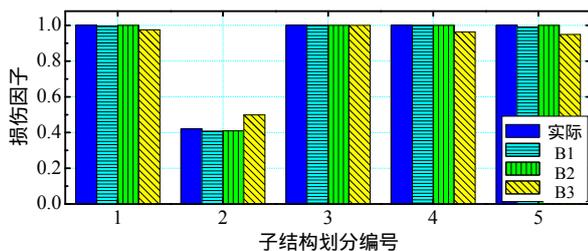


图15 子结构损伤因子

Fig.15 Damage extents of substructure

3 结论

本文在约束子结构的脉冲响应方法基础上,对基于时间序列方法中响应的提取方法进行了改进,建立和统一了两者的约束方程,并结合悬臂梁的试验验证了时间序列方法的有效性,得到了以下主要结论:

(1) 揭示了约束子结构方法的本质:利用子结构的“约束响应”的卷积组合限制“基本响应”中子结构边界的响应在一段时间内为零,从而等价于在子结构边界上施加虚拟支座,将子结构分离出来,构造约束子结构,利用该思想可以更为灵活的使用约束子结构方法。

(2) 通过悬臂梁的局部动力测试,由局部响应的时序实现了子结构的快速准确地分离和识别,验证了约束子结构方法有效性。

参考文献:

[1] 欧进萍. 重大工程结构智能传感网络与健康监测系统

的研究与应用[J]. 中国科学基金, 2005, 19(1): 8-12.

Ou Jinping. Research and practice of smart sensor networks and health monitoring systems for civil infrastructures in mainland china [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2005, 19(1): 8-12. (in Chinese)

[2] Reich G W, Park K C. Experimental application of a structural health monitoring methodology [C]// Liu S C. Proceedings of the SPIE, In Smart Structures and Materials, 2000(3988): 143-153.

[3] Park K, Reich G W, Alvin K F. Structural damage detection using localized flexibilities [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999, 9(11): 911-919.

[4] Yun C, Lee H. Substructural identification for damage estimation of structures [J]. Structural Safety, 1997, 19(1): 121-140.

[5] Koh C G, Shankar K. Substructural identification method without interface measurement [J]. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), 2003, 129(7): 769-776.

[6] Yang J, Huang H. Substructure damage identification using sequential nonlinear Lse method [C]. 4th International Conference on Earthquake Engineering. Taipei, China, 2006, Paper No: 119.

[7] 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 Suying, Li Zhongxian. A double-element substructure method for physical parameter identification of bridge structures [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(6): 68-72. (in Chinese)

[8] 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 Xianzhong, Yi Weijian. A substructure method for parameter estimation in time domain [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(5): 94-98. (in Chinese)

[9] 郭力, 李兆霞, 陈鸿天. 基于子结构分析的多重子步模型修正方法[J]. 中国工程科学, 2006, 8(9): 42-48.

Guo Li, Li Zhaoxia, Chen Hongtian. Multi-stage model updating method via substructure analysis [J]. Engineering Science, 2006, 8(9): 42-48. (in Chinese)

[10] 侯吉林, 欧进萍. 基于局部脉冲响应的约束子结构修正法[J]. 工程力学, 2009, 26(11): 23-30.

Hou Jilin, Ou Jinping. Isolated substructure model updating method based on local impulse response [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(11): 23-30. (in Chinese)

[11] Hou J, Jankowski L, Ou J. Experimental study of the substructure isolation method for local health monitoring [J]. Structural Control & Health Monitoring, 2012, 19: 491-510.

[12] 侯吉林, 欧进萍. 基于局部时间序列的约束子结构修正法[J]. 振动工程学报, 2009, 22(3): 305-312.

Hou Jilin, Ou Jinping. Isolated substructure model updating based on local time series [J]. Journal of Vibration Engineering, 2009, 22(3): 305-312. (in Chinese)