文章编号：1006-1355(2014)02-0148-04

高通滤波在损伤检测中的应用

张 炜，曾义权

（中国人民解放军91379部队，山东 青岛 266002）

摘 要：提出一种基于结构模态的高通滤波损伤检测方法，该方法不需要无损伤梁的结构模态。把损伤梁的结构模态作为一组一维离散信号，包括变化缓慢的低频分量（结构模态）和变化迅速的高频分量（损伤），运用数字滤波技术对其进行高通滤波，从损伤梁的结构模态中提取出高频成份，即模态中的损伤信号，从而可以直观的得到损伤的位置，数量和大小。给出了高通滤波方法的理论数值计算。分析了不同损伤位置和损伤程度的情况，并用铝质梁进行了实验研究，证明了此方法在梁结构损伤识别和健康监测中的有效性。

关键词：声学；高通滤波；梁；损伤；结构模态

中图分类号：TB123；O327 **文献标识码**：A DOI编码：10.3969/j.issn.1006-1335.2014.02.034

Application of High-pass Filtering in Damage Identification

ZHANG Wei, ZENG Yi-quan

(The 91379 th Unit of PLA, Qingdao 266002, Shandong China)

Abstract : A new damage detection technique using high-pass filtering based on structural modal is proposed. This method, with no need of the data of health structures, uses the modals of the damaged structure as a group of one-dimensional discrete signals, including slowly varying low-frequency components from the structure modals and rapidly varying high-frequency components from the structure damages. Then, the digital filtering technique is used to carry out the high-pass filtering. Taking a cracked beam as an example, the modals of the beam are obtained; then, a simple algorithm of high-pass filtering is developed to extract the high-frequency components from the mode shape; and finally, the location, number and size of the cracks in the beam can be determined by the peak value. In addition, the experiment of an aluminum beam is done, and the effectiveness of this new technique in damage identification and health monitoring of beam-type structures is verified by comparing the computation data with the experimental data.

Key words : acoustics ; high pass filtering ; beam ; damage ; structure modal

结构的健康监测（SHM）在维护结构的完整性和安全性，避免灾难性事故等方面具有重要意义。在众多的结构健康监测技术中，以振动响应为基础的损伤检测方法，由于其实现简单，受到了广泛的关注。损伤会造成结构物理特性的改变，如刚度的降低会造成结构固有频率的降低，因而利用结构固有频率的变化可以检测损伤的存在。但是由于固有频率属于结构的全局量，只能用于损伤的识别而不能用于损伤的定位[1]。

为了确定损伤的位置和大小，科研工作者进行了大量的研究[1]。大多数的算法需要提供结构完整状态下的数据，这往往难以做到。利用曲率模态的方法可以有效识结构的多处损伤[2]，但是这种方法要求提供结构损伤前的曲率模态。为了解决这一问题，学者们进行了许多的研究和探索，其中空间小波变换进行梁结构的损伤识别方法已被广泛采用[3]。对位移模态进行小波变换，在损伤处会出现小波系数模的极大值，以此来实现对损伤的定位，而良好检测结果的获得，需要选择合适的母小波和变换尺度，而且研究结果表明，仅仅利用小波系数很难识别损伤程度[4]。为此，Douka[5]提出了可以反映损伤程度的强度因子，但强度因子的求得却带来了巨大的计算量。康兴无[6]等从结构刚度和柔度矩阵的正交性出发，结合有限元理论和矩阵摄动理论，提出基于柔度变化的结构损伤检测指标，并通过平面桁架结构

收稿日期：2013-04-08

作者简介：张 炜（1985- ），男，江西湖口人，工学硕士，目前从事飞行器的维护工作。

E-mail: 276693668@qq.com

的数值模拟证明了该方法的有效性。

提出了基于高通滤波的结构损伤检测方法，该方法具有不需要结构完整状态下模态信息的优点，而且计算快捷，损伤定位准确，同时可以为损伤程度的估计提供重要参考依据。文中先以双裂纹梁为例给出了含裂纹梁的模态分析，然后阐明了基于高通滤波的损伤检测的原理，并给出了数值算例，讨论了仿真处理的结果，最后分别以单裂纹梁和双裂纹梁为例，进行了实验验证。

1　含裂纹梁的模态分析

一悬臂梁长 L，宽和高都为 h，如图1，裂纹模拟为无质量扭转弹簧，裂纹位置为 l_1 和 l_2，裂纹深度分别为 a_1 和 a_2。

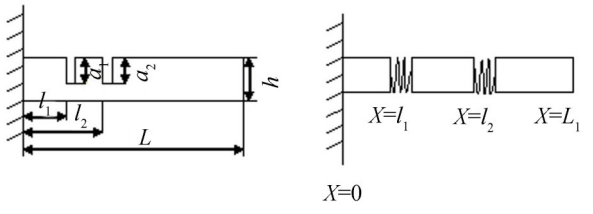


图1　双裂纹悬臂梁模型

由文献 [7]可知，裂纹处的局部柔度可表示为

$$c = 5.346\frac{h}{EI}J(\frac{a}{h}) \tag{1}$$

其中 a 为裂纹深度，E 为悬臂梁的弹性模量，I 为转动惯量，$J(a/h)$ 为柔度函数，其表达式如下

$$\begin{aligned} J(a/h) = {} & 1.8624(a/h)^2 - 3.95(a/h)^3 + \\ & 16.37(a/h)^4 - 37.226(a/h)^5 + \\ & 71.86(a/h)^6 - 126.9(a/h)^7 + \\ & 172(a/h)^8 - 43.97(a/h)^9 + 66.56(a/h)^{10} \end{aligned} \tag{2}$$

每段梁的位移为

$$\begin{aligned} W_1(x) = {} & t_1\sin(Kx) + t_2\sin(Kx) + \\ & t_3\sin(Kx) + t_4\sin(Kx) \\ W_2(x) = {} & t_5\sin(Kx) + t_6\sin(Kx) + \\ & t_7\sin(Kx) + t_8\sin(Kx) \\ W_3(x) = {} & t_9\sin(Kx) + t_{10}\sin(Kx) + \\ & t_{11}\sin(Kx) + t_{12}\sin(Kx) \end{aligned} \tag{3}$$

上式中 $K^4 = \omega^2\rho Al^4/(EI)$，其中 A 为梁的横截面积，ω 为梁的振动角频率，ρ 为梁的密度，$t_i(i=1\sim12)$ 为未知系数。悬臂梁边界条件如下

$$\begin{aligned} & x=0:\ W_1(0)=0,\quad \frac{\partial W_1}{\partial x}(0)=0, \\ & x=l:\ \frac{\partial^2 W_3}{\partial x^2}(l)=0,\quad \frac{\partial^3 W_3}{\partial x^3}(l)=0, \end{aligned} \tag{4}$$

裂纹处的连续性条件为

$$\begin{aligned} & x=l_1:\quad W_1(l_1)=W_2(l_1), \\ & \frac{\partial^2 W_1}{\partial x^2}(l_1)=\frac{\partial^2 W_2}{\partial x^2}(l_1), \\ & \frac{\partial^3 W_1}{\partial x^3}(l_1)=\frac{\partial^3 W_2}{\partial x^3}(l_1),- \\ & EI\frac{\partial^2}{\partial x^2}W_1(l_1)c_1=\frac{\partial}{\partial x}W_1(l_1)-\frac{\partial}{\partial x}W_2(l_1) \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} & x=l_2:\quad W_2(l_2)=W_3(l_2), \\ & \frac{\partial^2 W_2}{\partial x^2}(l_2)=\frac{\partial^2 W_3}{\partial x^2}(l_2), \\ & \frac{\partial^3 W_2}{\partial x^2}(l_2)=\frac{\partial^3 W_3}{\partial x^2}(l_2), \\ & -EI\frac{\partial^2}{\partial x^2}W_2(l_2)c_2=\frac{\partial}{\partial x}W_2(l_2)-\frac{\partial}{\partial x}W_3(l_2) \end{aligned} \tag{6}$$

由式(4)、(5)、(6)可得12个方程，写成矩阵形式

$$[f(\boldsymbol{K})]\begin{bmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_{12} \end{bmatrix} = 0 \tag{7}$$

由(7)式有非零解可得特征方程

$$|f(\boldsymbol{K})| = 0 \tag{8}$$

解特征方程可得到梁的任意阶固有频率 $\boldsymbol{K}$，再 $\boldsymbol{K}$ 代回(7)式，可得到系数 $t_i(i=1\sim12)$，将 $\boldsymbol{K}$ 和 $t_i(i=1\sim12)$ 代回(3)式得到模态振型。

2　基于高通滤波的损伤检测

图2(a)表示实验测量所得的损伤梁的结构模态，可以把它看成由两部分组成：没有损伤和噪声的完整梁模态(图2(b))和由损伤和噪声组成的不规则成分(图2(c))。一般情况，在损伤很小的时候，模态变化不明显，无法从模态上区别出损伤点，为了克服这一情况，可以直接利用高通滤波的方法过滤掉模态中无损伤的模态，仅仅提取出损伤的成份来观察，这样就能把细小的损伤信号放大，使之一目了然。假设测量模态为 M，完整模态为 W，损伤和噪声为 R，则有

$$M = W + R \tag{9}$$

滤波是有选择的提取或去除信号中某些频率信号，高通滤波就是衰减或滤除掉信号的中的低频率分量，保留信号中的高频分量，强化信号的锐变[8]。若 $M(x)$ 为测量模态，$H(x)$ 为滤波函数，则有

$$R(x) = M(x)\times H(x) \tag{10}$$

输出 $R(x)$ 为输入 $M(x)$ 与滤波函数 $H(x)$ 的卷积。

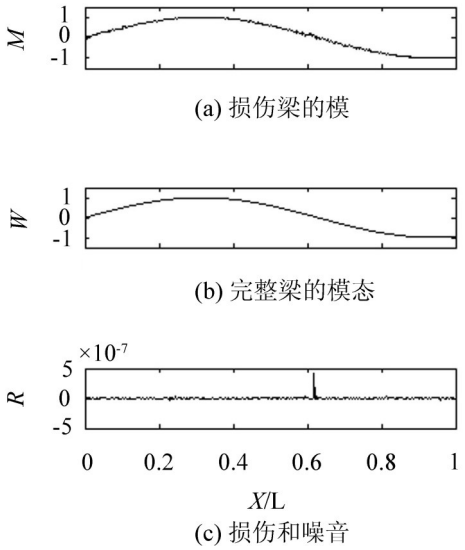


图 2 测量模态的组成

3 数值算例

以双裂纹的悬臂梁为例，对所述的高通滤波方法进行数值模拟。一悬臂梁长300 mm，宽度b和高度h均为10 mm，假设梁的固定端在x=0处，第一条裂纹的位置为l_1=30 mm处，相对深度为0.05，第二条裂纹的位置l_2=150 mm，相对深度为0.05，计算模态时，悬臂梁每隔1 mm一个点共301个点，运用前文所述的模态分析方法可得前四阶模态振型如图3所示。

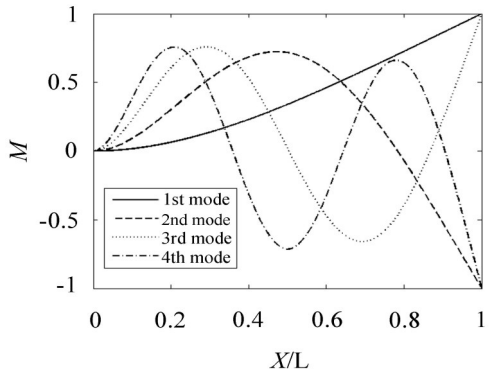


图 3 悬臂梁前四阶模态振型

显然，从图3无法直接得到裂纹位置。

3.1 损伤的定位

运用巴特沃斯数字滤波器对前两阶模态进行高通滤波，巴特沃斯滤波器最早由英国工程师斯替芬·巴特沃斯提出，其特点是通频带内的频率响应曲线最大限度平坦，没有起伏，而在阻频带则逐渐下降为零。巴特特沃斯数字滤波器可以直接通过Matalb软件中的butter函数实现，其调用格式为[b，a]=butter (n，Wn，'high')，n表示滤波器阶数，Wn表示截止频率，为归一化频率，high表示高通滤波。利用巴特沃斯2阶和4阶高通滤波，截止频率为0.08，取滤波后值R的平方，分析结果图7。

从图4可以清晰的看到，前两阶模态中在损伤置会出现尖锐的突变,对损伤位置的识别效果非常好，同时可以看出，对于相同损伤程度的不同位置，在同阶模态中有不同的突变值，对于同一位置的相同损伤程度，在不同阶模态中也有不同的突变值。但在同阶模态中的相同位置，不同损伤大小呈现出有规律的突变，这点可以作为估计损伤程度的依据。同时，从图4可以看到，选择适合的滤波器参数，会得到更好的结果。

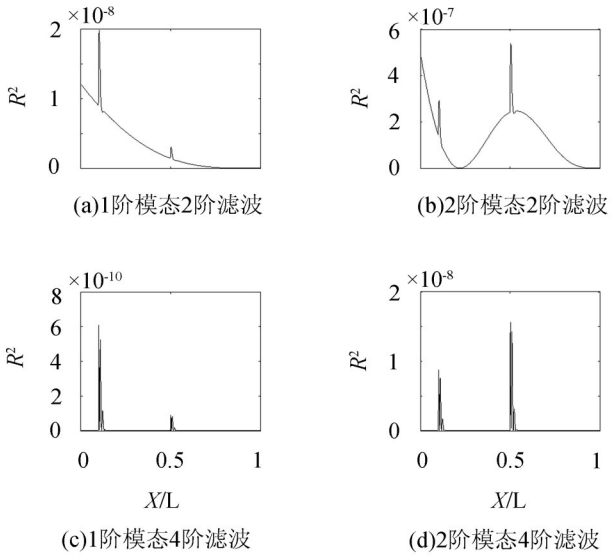


图 4 模态振型的巴特沃斯高通滤波

3.2 损伤程度的估计

下面仍以上述规格悬臂梁为例，假设其只在150 mm处有一条裂纹，分别取0.10 h，0.15 h，0.20 h三个不同的损伤深度，研究其对滤波后结果的影响。以1阶模态为例，图5表示损伤标准R^2和随损伤深度之间的变化关系（为了看得更清楚，将损伤因子纵坐标取对数），可见，R^2的值随损伤深度的增加而增大。因此，对于同一损伤位置，可以将突变值的大小作为评估损伤程度的依据。

4 实验分析

该实验用一铝质梁，长度L=510 mm，宽b=30 mm，高h=5 mm。实验一裂纹位于255 mm处，实验二中裂纹位于150 mm和300 mm处，裂纹深度均为2 mm。将梁平均分成17段，每段长度为30 mm。实

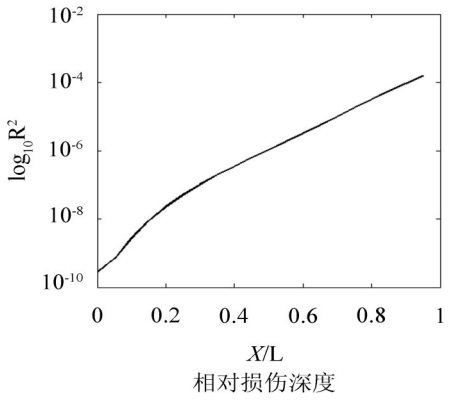


图 5　R^2随损伤深度的变化

验设备为江苏联能电子技术有限公司的振动力学综合实验系统，如图6所示。

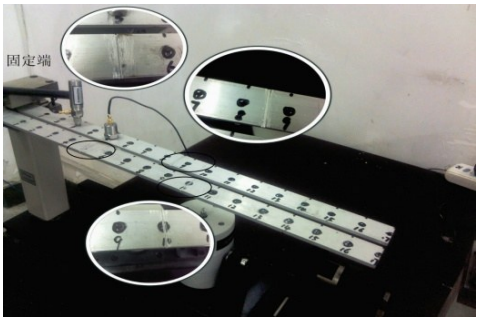


图 6　振动力学综合实验系统

利用冲击激励法测量损伤梁的模态参数，采用逐点激励，单点响应的方式，响应测量点选在第五点，实验的采样频率为5 000 Hz，用力锤依次对17个点进行敲击，每个点敲击3次得到传递函数的平均值，最后由配套软件得到损伤梁的结构模态。观察实验结果发现该实验的2阶模态具有较小的阻尼比，实验测得2阶模态如图7所示。

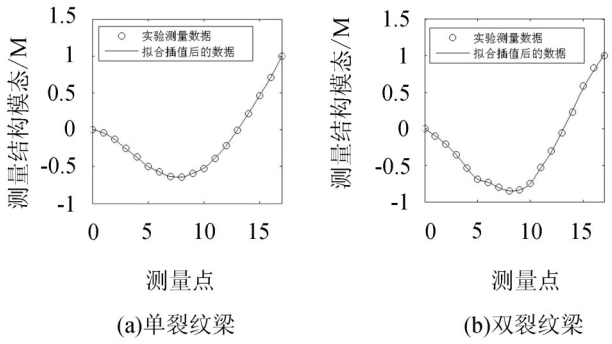


图 7　实验测量2阶模态

图8为实验测量2阶模态的高通滤波分析结果。

实验一的检测结果与实际损伤位置略有偏差，这是由于实验误差所造成的。实验二的高通滤波结果与裂纹位置完全一致。

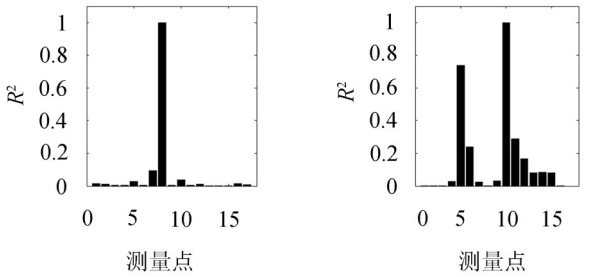


图 8　单双裂纹梁2阶模态高通滤波

5　结 语

从理论和实验两方面验证应用高通滤波方法检测结构损伤的有效性，这种方法直接从实验测得的模态入手，不仅不需要结构健康状态下的模态信息，而且可以快速准确的识别结构的一处或者多处损伤，滤波后的损伤标准R^2可以很好的反映出损伤的程度，依此可以对损伤程度进行定量分析，但对于损伤程度的精确计算，还需要进一步深入研究，同时需要提高测试设备的精度，以获取更精确的测量数据，使分析结果更接于实际损伤的情况。

参考文献：

[1] 王术新，姜　哲. 基于结构振动损伤识别技术的研究现状及进展[J]. **振动与冲击**，2004，23(4)：99-102.

[2] 刘义伦，时圣鹏，廖　伟. 利用曲率模态识别桥梁损伤的研究[J]. **振动与冲击**，2011，30(8)：77-81.

[3] Wang Q and Deng X. Damage detection with spatial wavelets[J]. **International Journal of Solids and Structures,** 1999, 36, 927-939.

[4] Quek S, Wang Q, Zhang L and Ang K. Sensitivity analysis of crack detection in beams by wavelet technique[J]. **International Journal of Mechanical Science,** 2001,Vol. 43, 2899-2910.

[5] Douka E, Loutridis S and Trochidis A. Crack identification in beams using wavelet analysis[J]. **International Journal of Solids and Structures,** 2003, Vol. 40, 3557-3569.

[6] 康兴无，陈世健，刘　勇，马慧娟. 一种基于柔度的结构损伤定位新方法[J]. **噪声与振动控制**，2009，6：40-43.

[7] Shifrin EI. Ruotolo R. Natural frequencies of a beam with an arbitrary number of cracks[J]. **Journal of Sound and Vibration,** 1999(03): 409-423.

[8] 雷学堂，徐火希. FIR数字高通滤波的时域和频域物理分析[J]. **吉首大学学报**(自然科学版)，2006，27(5)：66-71.