

基于 S 变换和互信息的梁类结构裂纹定位方法^{*}

蒋 勉¹, 张文安², 伍济钢², 卢清华¹
(1. 佛山科学技术学院机电工程与自动化学院 佛山, 528000)
(2. 湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室 湘潭, 411201)

摘要 实际使用中的梁类结构容易萌生裂纹,影响其使用寿命及安全可靠运行,准确判定其裂纹损伤位置对于实现梁类结构的快速准确维护处理具有重要意义,为此提出基于振动信号 S 变换和互信息值实现梁类结构裂纹的识别与定位。首先,基于测试获得梁类结构上分布点的振动信号;其次,利用 S 变换将振动信号变换到时频域,计算梁结构在裂纹损伤前后各对应位置点时频域振动信号的互信息值;最后,通过检索互信息值向量中分量的最小值位置实现裂纹区域的准确定位。为了避免引入附加质量的影响,利用机器视觉测振系统采集悬臂梁和小型复合材料叶片上的分布点振动信号,设置不同裂纹位置对梁类结构裂纹定位方法进行了验证,证明了方法的有效性。

关键词 梁类结构;裂纹定位;振动法;互信息;S 变换
中图分类号 TH17

引 言

振动法是结构损伤检测的主流和核心方法之一,目前已实现在土木工程和机械工程等领域的广泛应用。振动法可直接利用振动信号提取损伤指标进行分析,是一种有效的损伤检测方法。基于振动的结构损伤识别方法一般可分为基于频率、振型和频响函数的方法。实际上,这几类方法大多是基于线性假设,面对工程实际对象的应用需要进一步开展研究。同时,许多学者^[1-10]在利用非线性振动分析对结构损伤和裂纹检测方面也作出了一些重要工作,其基本思路是将裂纹视为梁类结构中的附加非线性因素,通过考察梁的非线性动力学行为特性来实现对梁上裂纹的检测与识别。上述研究成果表明,通过量化裂纹产生前后梁振动响应中非线性特性的变化也是实现梁结构裂纹检测的一条重要途径。在假定获得叶片上分布点非线性振动响应的前提下,蒋勉等^[11]提出了利用振动响应非线性程度估计的叶片裂纹定位方法并进行了仿真验证,然而该方法在计算过程中采用奇异值分解技术来估计分布振动信号非线性程度的变化,在实际应用中容易受

到外部环境噪声干扰而影响裂纹定位的准确度。因此,本研究进一步提出基于 S 变换和互信息值从分布振动信号中提取损伤识别指标来实现梁类结构的裂纹定位,通过检索裂纹损伤前后各位置点振动信号互信息值向量的分量最小位置来实现裂纹区域的准确定位。方法计算速度较快且结果准确,利用机器视觉测振系统对铝合金悬臂梁和小型复合材料叶片进行非接触式振动信号测量,设置不同位置裂纹进行实验,验证了方法的有效性。

1 S 变换及互信息熵的定义

梁类结构上裂纹损伤产生前后,同一位置点测量得到的振动信号特征将发生改变,其振动信号的相似程度也将发生改变。互信息熵是用来衡量两个振动信号之间相似程度的指标,互信息熵值越大代表两个信号之间的相似程度越高。为了准确衡量两个振动响应信号之间的相似程度,笔者提出将振动信号利用 S 变换到时频域中得到图像信号。

S 变换是由 Stockwell 等^[12]在研究短时傅里叶变换和连续小波变换的基础上提出,是一种采用可伸缩的高斯窗函数对信号进行分析的时频分析方

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1308000);国家自然科学基金资助项目(51775182);湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ3170)
收稿日期:2018-11-15;修回日期:2019-03-14

法。S 变换的结果与频谱是对应的,能提取信号任意频率分量的特征信息,具有更好的抗噪特性。

对信号 $x(t)$, 其一维连续 S 变换定义为

$$S(\tau, f) = e^{i2\pi f\tau} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \omega(t - \tau, d) dt \tag{1}$$

其中: d 为扩张因子,是频率 f 的倒数; $\omega(t, f)$ 为小波函数; τ 为时间,控制窗口函数在时间轴上的位置; $S(\tau, f)$ 为时频谱矩阵。

$\omega(t, f)$ 的表达式为

$$\omega(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f t} \tag{2}$$

结合式(1)和式(2),可得 S 变换的最终表达式为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f t} dt \tag{3}$$

信息熵把信息定义为“熵的减少”,即“系统或事物不确定性的减少”,因而提出了对信息进行定量描述的方法。设由一个离散随机变量 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 所给定的信源,其出现的概率 $p_i = p_X(x_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 且 $\sum_{i=1}^n p_i = 1$, 则 X 的信息熵表示为

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_X(x_i) \log p_X(x_i) \tag{4}$$

信息熵 $H(X)$ 是从平均意义上表征信源总体信息测度的一个量,同时又是信源输出信息的不确定性和事件发生随机性的量度。信息熵越大,信息量越多,信源越不确定。

联合熵用来衡量两个随机变量含有的信息量之和。假设二元随机变量 (X, Y) 的联合概率分布为 $P_{X,Y}(x, y)$, 那么两者的联合熵 $H(X, Y)$ 定义为

$$H(X, Y) = - \sum_{x,y} P_{X,Y}(x, y) \log P_{X,Y}(x, y) \tag{5}$$

对两个随机变量 X 和 Y , 其互信息熵可定义为

$$I(X, Y) = \sum_{x,y} P_{X,Y}(x, y) \log \frac{P_{X,Y}(x, y)}{P_X(x) P_Y(y)} \tag{6}$$

其中: $P_X(x)$, $P_Y(y)$ 为随机变量 X, Y 相互独立时的边缘概率分布。

由此可见,互信息熵是通过计算其边缘概率分布 $P_X(x)$, $P_Y(y)$ 及其联合概率分布 $P_{X,Y}(x, y)$ 来得到。互信息熵与信息熵、联合熵的关系可表达为

$$I(X, Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y) \tag{7}$$

互信息^[13] 是通过检测概率分布的不同来度量两个信号之间所共有的信息量,可对变量间的非线性关系进行评估。若要计算图像信号 X 和 Y 的信息熵和互信息,关键是计算 X 和 Y 的边缘概率分布

及它们的联合概率分布。一般使用非参数方法来估计其概率分布,而非参数方法主要包括直方图法、核函数法和平均直方图法 3 种方法。其中,直方图法是最常用、最直观的一种非参数方法。本研究中互信息值的计算是基于振动信号 S 变换后得到的图像信号,其边缘概率分布和联合概率分布以直方图为基础进行求解。直方图是一幅统计报告图,可用来表示数据类型分布情况,通常情况下其横坐标表示数据类型,纵坐标表示分布情况。对于图像信号而言,直方图的横坐标表示图像像素的灰度级,纵坐标表示该灰度级的像素数量。可通过直方图统计一幅图像中各灰度值的像素数目,再将其分别除以总的像素数目即可得到图像的灰度值概率分布。对同样大小的图像信号 X 和 Y , 假定其灰度直方图分别为 $h(x)$ 和 $h(y)$, 则相应的概率分布 $P_X(x)$ 和 $P_Y(y)$ 可表示为

$$\begin{cases} P_X(x) = h(x) / \sum_{x \in X} h(x) \\ P_Y(y) = h(y) / \sum_{y \in Y} h(y) \end{cases} \tag{8}$$

其中: x 为图像信号 X 中灰度值为 x 的像素; y 为图像信号 Y 中灰度值为 y 的像素; $h(x)$ 为图像信号 X 中灰度值为 x 的像素数目; $h(y)$ 为图像信号 Y 中灰度值为 y 的像素数目; $\sum_{x \in X} h(x)$ 为图像信号 X 中总的像素数量; $\sum_{y \in Y} h(y)$ 为图像信号 Y 中总的像素数量。

相应地,图像信号 X 和 Y 对应位置处的灰度值分别为 x 和 y 的像素对的数目,可以联合直方图来进行统计,记为 $h(x, y)$, 则其联合概率密度分布为

$$P_{X,Y}(x, y) = \frac{h(x, y)}{\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} h(x, y)} \tag{9}$$

其中: $\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} h(x, y)$ 为图像信号 X 和 Y 总的像素数目。

2 梁类结构裂纹定位方法

假定在梁结构有裂纹和无裂纹时施加相同激励信号,并在设置的相同特征点位置测量得到振动信号。由于裂纹损伤的产生将导致梁上相同位置点的振动信号发生改变,梁结构损伤产生前后同一位置点振动信号的相似程度亦发生变化,因此,可采用互信息熵值度量梁结构上同一位置点在损伤产生前后振动信号的相似性来判断裂纹损伤是否存在。当梁上裂纹损伤出现时,临近裂纹发生区域采集点的振

动响应复杂程度变化最大,振动响应的概率分布函数也随之改变,使得其临近点损伤前后振动响应信号的相似性最低,即互信息值最小。因此,可通过对叶片裂纹损伤前后各分布点振动信号互信息值的计算来定义损伤位置识别指标,实现裂纹的定位。梁裂纹定位方法计算流程如图 1 所示。

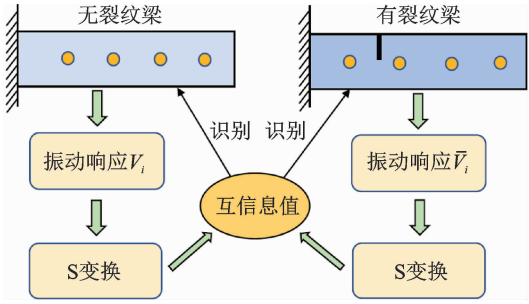


图 1 梁结构裂纹定位方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of crack location methods for beam structures

具体计算步骤如下。
1) 设定在梁结构上的振动响应测量点位置为 $z_1, z_2, \dots, z_n$, 其中 n 为沿梁边缘截面轴向方向上标记振动响应测量点的个数, 得到梁无裂纹和有裂纹时各标记点位置的振动响应 V 和 $\bar{V}$ 为

$$\begin{aligned} V &= (V_1, V_2, \dots, V_n) \\ \bar{V} &= (\bar{V}_1, \bar{V}_2, \dots, \bar{V}_n) \end{aligned} \tag{10}$$

2) 无裂纹和有裂纹时梁上第 i 个标记点的振动响应信号分别为 V_i 和 $\bar{V}_i$, 进行 S 变换得到矩阵描述如式(11)和式(12)所示

$$S_{V_i} = \begin{bmatrix} s_{V_i}(\tau_0, f_0) & s_{V_i}(\tau_0, f_1) & \dots & s_{V_i}(\tau_0, f_{i-1}) \\ s_{V_i}(\tau_1, f_0) & s_{V_i}(\tau_1, f_1) & \dots & s_{V_i}(\tau_1, f_{i-1}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{V_i}(\tau_{i-1}, f_0) & s_{V_i}(\tau_{i-1}, f_1) & \dots & s_{V_i}(\tau_{i-1}, f_{i-1}) \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$S_{\bar{V}_i} = \begin{bmatrix} s_{\bar{V}_i}(\tau_0, f_0) & s_{\bar{V}_i}(\tau_0, f_1) & \dots & s_{\bar{V}_i}(\tau_0, f_{i-1}) \\ s_{\bar{V}_i}(\tau_1, f_0) & s_{\bar{V}_i}(\tau_1, f_1) & \dots & s_{\bar{V}_i}(\tau_1, f_{i-1}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{\bar{V}_i}(\tau_{i-1}, f_0) & s_{\bar{V}_i}(\tau_{i-1}, f_1) & \dots & s_{\bar{V}_i}(\tau_{i-1}, f_{i-1}) \end{bmatrix} \tag{12}$$

3) 设无裂纹梁第 i 个测点振动信号矩阵 S_{V_i} 为图像信息 X_i , 有裂纹时同一标记点 i 的振动信号矩阵 $S_{\bar{V}_i}$ 为图像信息 Y_i , 计算得梁在裂纹损伤前后第 i 个测点的互信息 $I(X_i, Y_i)$ 为

$$I(X_i, Y_i) = H(X_i) + H(Y_i) - H(X_i, Y_i) \tag{13}$$

其中: $H(X_i)$ 为图像 X_i 的信息熵; $H(Y_i)$ 为图像 Y_i 的信息熵; $H(X_i, Y_i)$ 为 (X_i, Y_i) 的联合熵。

4) 由于裂纹损伤前后每个特征点的互信息值是以振动响应 S 变换后的图像信息计算的, 其取值范围为 $[0, 1]$, 因此定义裂纹位置识别指标 δ_i 为

$$\delta_i = I(X_i, Y_i) \tag{14}$$

对每一个特征点损伤前后的振动响应按上述步骤进行计算, 则裂纹损伤前后各特征点 $z_1, z_2, \dots, z_n$ 的损伤识别指标向量 δ 为

$$\delta = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n] \tag{15}$$

设 δ_p 为损伤识别指标向量 δ 分量的最小值, 即有

$$\delta_p = \min\{\delta\} = \min\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\} \tag{16}$$

根据梁类结构裂纹损伤前后各特征点振动信号建立的损伤识别指标向量 δ , 通过检索其分量的最小值 δ_p 的对应位置 z_p , 可判断梁裂纹的位置就在 $[z_{p-1}, z_p]$ 之间。

3 实验验证

为避免引入振动传感器的附加质量影响, 采用基于机器视觉的非接触测振实验系统对悬臂梁振动位移信号进行实验测试, 实验系统组成结构如图 2 所示。

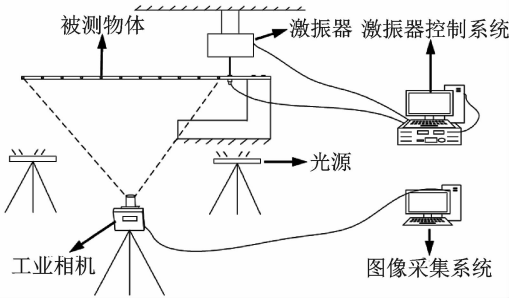


图 2 测振实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vibration measurement system

该系统主要由图 3 所示的激振系统、光源和图像采集系统等几大部分组成。其中, 被测物体的根部端通过螺母固定在基座上, 将被测物体与激振杆固定连接。通过对激振器控制系统的目标谱、进度表等参数设置产生激励信号加载到激振器上, 经加速度传感器反馈到激振控制器系统对被测物体进行振动激励。被测物体的边缘截面上设置等间距的反光标记点进行区域划分, 条形光源放置在被测物体的侧前方以保证标记点光照均匀。工业相机水平放置在被测物体的正前方进行连续图像采集, 将获取的序列图像传递给计算机的图像采集系统, 最后对

振动序列图像进行处理以获得被测物体标记点的振动位移信号。



图 3 激振器及其控制系统
Fig. 3 Shaker and control system

3.1 悬臂梁定频实验验证

利用搭建的机器视觉测振系统对悬臂梁进行定频激励振动测试实验,其中悬臂梁由同一铝板加工而成,两块悬臂梁之间的差异忽略不计。悬臂梁有效长度为 600 mm,有效宽度为 50 mm,厚度为 3 mm。裂纹参数设置如下:长度为 50 mm,宽度为 0.5 mm,深为 0.8 mm,其中用中性玻璃胶对裂纹进行填充处理,如图 4 所示。通过对悬臂梁进行扫频测试,获得悬臂梁各阶固有频率,并采用 2 阶固有频率对悬臂梁进行定频激励。裂纹设置在特征点之间不同位置进行研究,采集特征点振动信号并利用 S 变换到时频域中得到图像信号,再计算裂纹损伤前后悬臂梁上各对应特征点振动信号的互信息值,得到裂纹位置识别指标向量。通过检索各特征点互信息值最小值的位置实现对悬臂梁上裂纹区域的准确定位,验证裂纹定位方法的有效性。

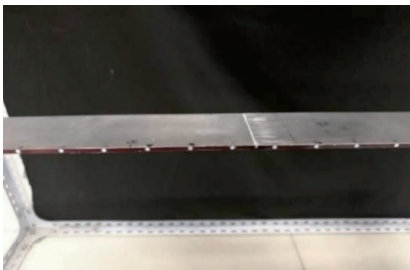


图 4 悬臂梁特征点及裂纹设置

Fig. 4 Characteristic points and crack setting of cantilever beam

将裂纹损伤设置在第 5,6 特征点之间时,对悬臂梁各特征点测量的振动信号进行分析。为了获得较好的信号分析精度,该 S 变换的参数选择如下:最小频率为 0,最大频率为 500 Hz,时间采样率和频率采样率都为缺省值 1。其中,第 5 和第 6 特征点振

动信号的 S 变换图像信号结果分别见图 5 和图 6。

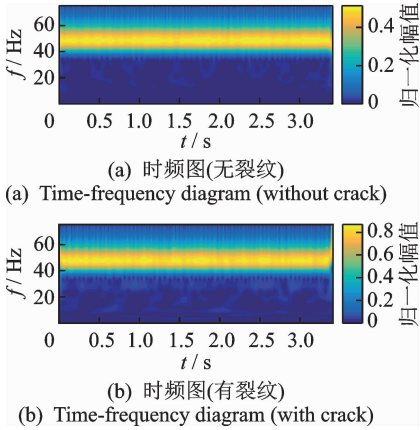


图 5 悬臂梁第 5 特征点信号 S 变换图像信号
Fig. 5 S transform image on characteristic point 5 of beam

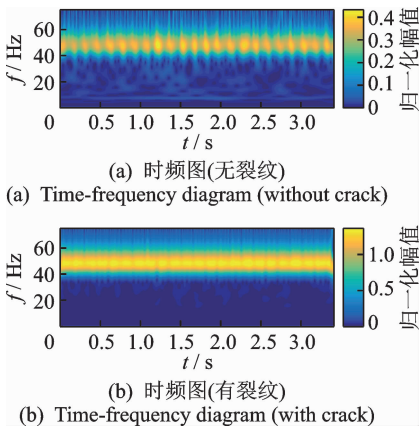


图 6 悬臂梁第 6 特征点信号 S 变换图像信号
Fig. 6 S transform image on characteristic point 6 of beam

根据 S 变换得到的裂纹损伤设置前后各特征点图像信号分别计算互信息值,计算结果见图 7。

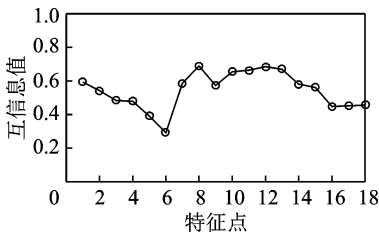


图 7 悬臂梁特征点互信息值(裂纹设置在 5,6 号之间)
Fig. 7 Mutual information values of cantilever beam (crack between characteristic point 5 and 6)

由图 7 可知,悬臂梁裂纹损伤前后各点互信息的值均小于 1,说明悬臂梁无裂纹和有裂纹损伤时各特征点振动信号并不相同。互信息可用来衡量两组图像信号相似程度的大小,且注意到 6 号特征点计算得到的互信息值最小。由于裂纹损伤出现时,靠近裂纹产生区域特征点振动信号变化最大,振动

信号的概率分布函数也随之改变,使得裂纹区域附近特征点振动信号的相似性最低,计算得到最小的互信息值。由于定频激励位置点在 1 特征点之前,振动即是弹性波由 1 号特征点位置向后传递。由于裂纹损伤存在对振动传递特性的影响,导致在其之后第 6 特征点计算得到的互信息值比在其之前的第 5 特征点计算得到的互信息值更小。结合图 7 检索各特征点互信息值最小值的位置,判断悬臂梁裂纹存在于 5,6 特征点之间的区域,这与实验设计的裂纹位置相符。

当裂纹设置在第 9,10 特征点之间时,对悬臂梁损伤前后各特征点测量振动信号进行分析,其中第 9 和第 10 特征点振动信号的 S 变换图像信号结果分别如图 8、图 9 所示。由于在定频激励条件下悬臂梁振动过程中节点的存在,裂纹设置在不同的位置时,对各特征点振动信号的影响也不相同,导致基于振动信号进行 S 变换得到的图像信号有差异。

根据 S 变换得到的裂纹损伤设置前后各特征点时频图分别计算互信息值,结果如图 10 所示。由

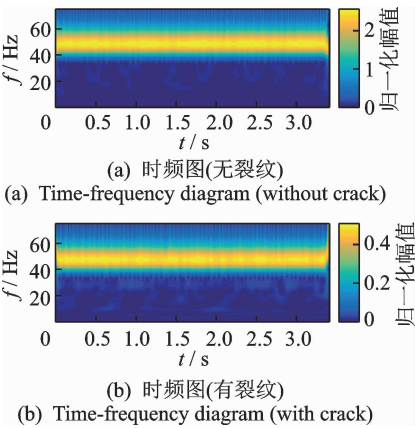


图 8 悬臂梁第 9 特征点信号 S 变换图像信号
Fig. 8 S transform image on characteristic point 9 of beam

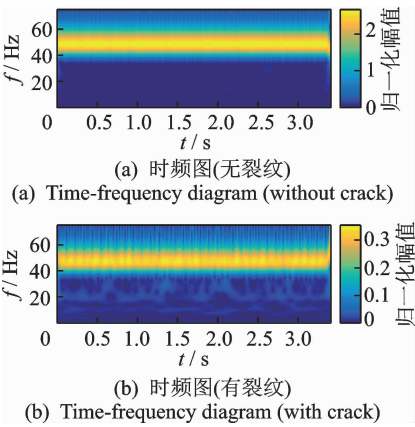


图 9 悬臂梁第 10 特征点信号 S 变换图像信号
Fig. 9 S transform image on characteristic point 10 of beam

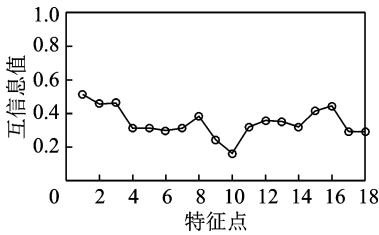


图 10 悬臂梁特征点互信息值(裂纹设置在 9,10 号之间)
Fig. 10 Mutual information values of cantilever beam (crack between characteristic point 9 and 10)

图 10 可知,悬臂梁裂纹损伤前后各点互信息的值均小于 1,且注意到 10 号特征点计算得到的互信息值最小。同时,由于裂纹损伤存在对振动传递性质的影响,导致在其之后第 10 特征点计算得到的互信息值比在其之前的第 9 特征点计算得到的互信息值更小。结合图 10 检索各特征点互信息值最小值的位置,可以判断悬臂梁裂纹存在于 9,10 特征点之间的区域,同样得到与实验设计相符合的结果。

3.2 小型复合材料叶片定频实验验证

利用搭建的机器视觉测振系统对小型复合材料叶片进行定频激励振动测试实验,其中叶片是由玻璃纤维复合材料板材水切割而成,叶片之间的差异忽略不计。小型叶片有效长度为 0.9 m,在叶片边缘截面粘贴等间距特征标记点对叶片进行区域划分。裂纹损伤设置于叶片中间靠近根部区域的叶片表面,宽度约为 1.5 mm,深度约为 1.2 mm,用中性玻璃胶对裂纹进行填充处理,如图 11 所示。



图 11 小型复合材料叶片裂纹设置
Fig. 11 Characteristic points and crack setting of blade

通过对复合材料叶片进行扫频测试获得各阶固有频率,并采用二阶固有频率对叶片进行定频激励。裂纹设置在特征点之间不同位置进行研究,采集特征点振动位移信号并利用 S 变换成为图像信号。为了获得较好的信号分析精度,该 S 变换的参数选择如下:最小频率为 0,最大频率为 500 Hz,时间采样率和频率采样率都为缺省值 1。计算裂纹损伤前后

叶片上各对应特征点振动信号 S 变换图像信号的互信息值,得到裂纹位置识别指标向量。通过检索各特征点互信息值最小值的位置进行裂纹定位验证方法的有效性。当裂纹设置在 4,5 特征位置点之间区域时,叶片第 4 和第 5 特征点振动信号的 S 变换图像信号结果分别如图 12、图 13 所示。

根据 S 变换得到的裂纹损伤设置前后各特征点图像信号分别计算互信息值,可得到叶片各特征点互信息值计算结果如图 14 所示。根据互信息可用

来衡量两组图像信号相似程度的大小。由于裂纹损伤出现时,裂纹区域附近特征点振动信号的相似性最低,计算得到最小的互信息值。结合图 14 检索各特征点互信息值最小值的位置,发现 5 号特征点位置振动信号计算得到的互信息值最小,判断悬臂梁裂纹存在于 4,5 特征点之间的区域,这与实验设计的裂纹位置相符。

当裂纹设置在第 6 和第 7 特征点之间时,对悬臂梁损伤前后各特征点测量振动信号进行分析,其中第 6 和第 7 特征点振动信号的 S 变换图像信号结果分别如图 15、图 16 所示。

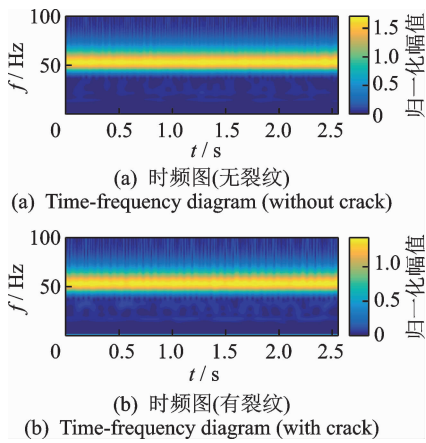


图 12 叶片第 4 特征点信号 S 变换图像信号

Fig. 12 S transform image on characteristic point 4 of blade

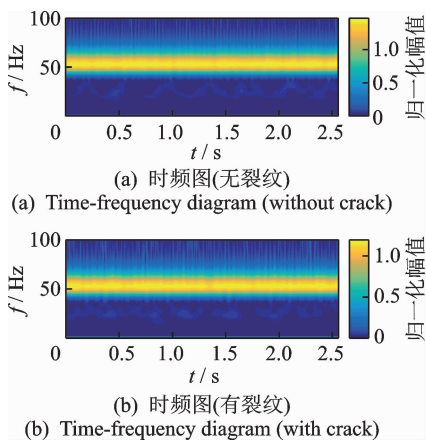


图 13 叶片第 5 特征点信号 S 变换图像信号

Fig. 13 S transform image on characteristic point 5 of blade

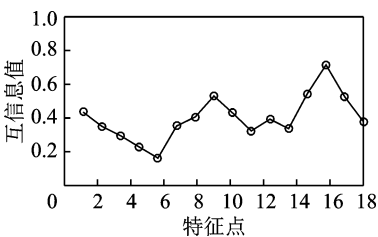


图 14 叶片裂纹设置在 4 和 5 特征点的互信息值

Fig. 14 Mutual information values of blade(crack between characteristic point 4 and 5)

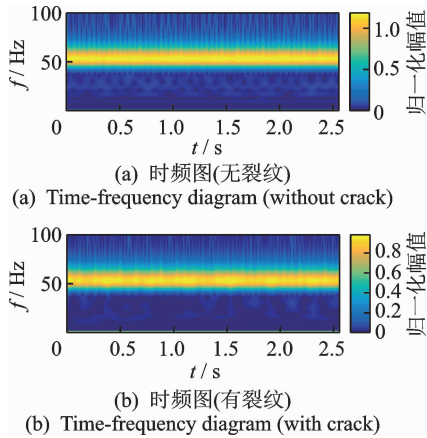


图 15 叶片第 6 特征点信号 S 变换图像信号

Fig. 15 S transform image on characteristic point 6 of blade

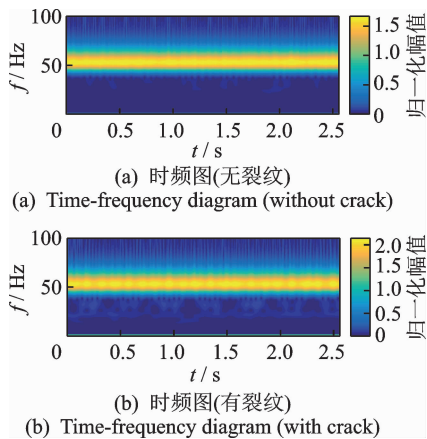


图 16 叶片第 7 特征点信号 S 变换图像信号

Fig. 16 S transform image on characteristic point 7 of blade

根据 S 变换得到的裂纹损伤设置前后各特征点图像信号分别计算互信息值,可得到互信息值计算结果如图 17 所示。由于裂纹损伤存在对振动传递的影响,导致在其之后第 6 和第 7 号特征点计算得到的互信息值比较小。结合图 17 检索各特征点互信息值最小值,发现 7 号特征点位置振动信号计算

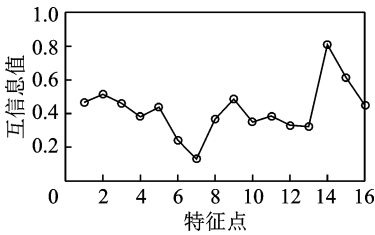


图 17 叶片裂纹设置在 6 和 7 特征点的互信息值
Fig. 17 Mutual information values of blade(crack between characteristic point 6 and 7)

得到的互信息值最小,可以判断叶片上设置的裂纹存在于 6,7 号特征点之间的区域,与实验设计的裂纹位置相符合。

4 结 束 语

在获得梁类结构上分布点振动信号的前提下,提出了基于 S 变换和互信息值建立裂纹损伤位置识别指标的裂纹定位方法。利用 S 变换将梁类结构上分布点振动信号变换到时频域获得图像信号,再计算梁结构在裂纹损伤前后各对应位置点图像信号的互信息值,通过检索损伤识别指标中分量的最小值来实现裂纹区域的准确定位。分别采用铝合金悬臂梁和小型复合材料叶片对定位方法进行验证,通过在两种梁类结构上设置不同位置的裂纹,采用机器视觉测振系统采集悬臂梁和小型复合材料叶片上各特征点位置的振动位移信号。利用所提出的方法对裂纹位置进行识别,识别结果和实验设计的裂纹位置相符,证明了方法的有效性。

参 考 文 献

[1] ANDREAUS U, BARAGATTI P. Cracked beam identification by numerically analyzing the nonlinear behaviour of the harmonically forced response[J]. Journal of Sound and Vibration,2011, 330(4):721-742.

[2] ANDREAUS U, BARAGATTI P. Experimental damage detection of cracked beams by using nonlinear characteristics of forced response[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2012,31:382-404.

[3] ANDREAUS U, BARAGATTI P. Fatigue crack growth, free vibrations, and breathing crack detection of aluminum alloy and steel beams[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2009, 44(7): 595-608.

[4] CHATTERJEE A. Structural damage assessment in a cantilever beam with a breathing crack using higher or-

der frequency response functions[J]. Journal of Sound and Vibration,2010, 329(16):3325-3334.

[5] MANOACH E, SAMBORSKI S, MITURA A, et al. Vibration based damage detection in composite beams under temperature variations using Poincaré maps[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 62(1): 120-132.

[6] GUO L Z, BILLINGS S A. Detection of fatigue cracks in a beam using a spatio-temporal dynamical system identification method[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 299(1/2): 22-35.

[7] HABTOUR E, COLE D, RIDDICK J C, et al. Detection of fatigue damage precursor using a nonlinear vibration approach[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(12):1442-1463.

[8] CHENG C M, PENG Z K, DONG X J, et al. A novel damage detection approach by using Volterra kernel functions based analysis[J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(8):3098-3112.

[9] LI X Z, PENG Z K, DONG X J, et al. A new transmissibility based indicator of local variation in structure and its application for damage detection[J]. Shock and Vibration, 2015, 2015(6):1-18.

[10] LANG Z Q, PARK G, FARRAR C R, et al. Transmissibility of nonlinear output frequency response functions with application in detection and location of damage in MDOF structural systems[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2011, 46(6):841-853.

[11] 蒋勉, 张文安, 伍济钢, 等. 一种利用振动响应非线性估计的叶片裂纹定位方法[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(4): 545-552.

JIANG Mian, ZHANG Wenan, WU Jigang, et al. A crack location method for blades via nonlinearity estimation of vibration response[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(4): 545-552. (in Chinese)

[12] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S-transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.

[13] 常银. 互信息学习在旋转机械故障诊断中的应用研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.



第一作者简介:蒋勉,男,1983 年 1 月生,博士、副教授。主要研究方向为机械系统动力学与非线性振动。曾发表《A precision on-line model for the prediction of thermal crown in hot rolling processes》(《International Journal of Heat and Mass Transfer》2014, Vol. 78) 等论文。
E-mail:mjiang@fosu.edu.cn