

文章编号:1001-4888(2012)05-0607-11

激励脉冲信号对基于周向导波的 圆环损伤检测的影响^{*}

李冰, 励争, 刘瑜

(北京大学 工学院 & LTCS, 北京 100871)

摘要: 针对含有径向裂纹的圆环, 本文主要研究了不同激励脉冲信号对基于周向导波的圆环损伤检测结果的影响。对具有径向裂纹以及没有裂纹的圆环, 分别用不同宽度的脉冲信号激励, 然后用 ABAQUS 程序数值计算其应变信号。由 Gabor 连续小波转换(CWT)处理上述应变信号以确定径向裂纹的位置。结果显示, 脉冲宽度对确定裂纹位置的精确性有很大影响。根据圆环的群速弥散曲线, 讨论了圆环上裂纹的确定方法。最后, 为验证检测圆环损伤所选择脉冲宽度的合理性, 进行了两次实验。两次实验提供了相同的结论。

关键词: 激励脉冲; 周向导波; 径向裂纹; Gabor 小波变换; 损伤检测

中图分类号: TV698.1⁺⁵ **文献标识码:** A

0 引言

由于导波具有传播距离远、衰减小, 能够实现快速、大范围区域的结构健康监测, 以及可以检测结构内部和表面缺陷等特点, 近年来基于导波的损伤检测已经成为工程结构健康监测研究的热点。然而, 导波的多模态与弥散等特性, 以及导波中包含损伤信号的微弱性, 使得从复杂的导波信号中提取损伤信息进行定量检测变得非常困难。薄壁环状或管状结构在航空航天、石油、建筑等工程结构中应用很广泛, 目前损伤检测多采用纵波法检测环向裂纹的产生^[1]。相比之下, 环状结构周向传播的导波非常复杂^[2,3], 致使径向裂纹的定量检测难度较大^[4]。

为了分析具有多模态、弥散的导波信息, 目前各种时频分析技术, 如小波变换、希尔伯特-黄变换、人工神经网络方法、时间反转理论等, 被广泛用于导波信号的处理分析的研究中。其中, 小波变换法由于具有局部化和自适应的时频分析特点, 能高精度、高效率地完成信号数据的处理, 已经被广泛应用于基于导波的梁、板等结构的定量损伤检测^[5-7], 但是在基于周向导波的圆环径向裂纹检测中的应用却很少。励争等曾采用 Gabor 小波变换在数值模拟上实现了基于周向导波的圆环结构径向裂纹位置的准确定位^[8], 但是文章中缺乏实验方法验证, 更没有对激励方式对裂纹检测精度的影响做进一步的研究。

本文首先采用数值模拟的方法研究了多种激励脉冲形式下圆环周向导波信息, 利用多频和单频 Gabor 小波变换分析确定圆环中径向裂纹的位置; 并结合圆环的群速度频散曲线, 分析了不同激励脉冲宽度对提取单频小波变换最优频率的影响, 定性给出激励脉冲宽度与损伤检测精度之间的关系。此外, 采用实验测试技术验证了这一规律, 进一步完善了基于周向导波的圆环损伤检测方法, 为其在实际工程结构中的应用提供了参考。

* 收稿日期: 2012-04-05; 修订日期: 2012-7-15

通讯作者: 励争, 女, 教授。E-mail: lizheng@pku.edu.cn

1 圆环周向导波的小波变换分析

1.1 圆环周向导波的频散曲线

多模态与弥散是圆环周向导波的主要特性,也是使得周向导波在圆环中传播变得非常复杂的原因。根据弹性力学波动理论^[9],考虑自由约束边界条件下圆环中周向导波的传播,圆环的内外半径分别为 r_1 和 r_2 ,其位移势函数为:

$$\varphi = \Phi(r)\exp(ikr\theta), \quad \psi = \Psi(r)\exp(ikr\theta) \quad (1)$$

其中, k 为波数。将 φ 和 ψ 的表达式代入波动方程:

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right\} \varphi + \frac{\omega^2}{c_L^2} \varphi = 0, \quad (2)$$

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right\} \psi + \frac{\omega^2}{c_T^2} \psi = 0$$

可得到 Bessel 方程,然后对方程进行无量纲化,并考虑自由约束的边界条件:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = 0 \\ \sigma_{r\theta} = 0 \end{cases} \text{ 在 } r = r_1 \text{ 或 } r = r_2 \text{ 处} \quad (3)$$

得到一个关于常向量 A 的齐次方程组:

$$D(\bar{k}, \bar{\omega}) A = 0 \quad (4)$$

其中 $D(\bar{k}, \bar{\omega})$ 是关于无量纲化波数 \bar{k} 和无量纲化频率 $\bar{\omega}$ 的 4×4 的矩阵函数。为保证式(4)成立,其系数矩阵的行列式应为零,即

$$\text{Det}[D(\bar{k}, \bar{\omega})] = 0 \quad (5)$$

上式即为周向导波的频散方程。

以有机玻璃圆环为例,其内径 $r_1 = 46.21\text{mm}$ 、外径 $r_2 = 49.76\text{mm}$,弹性模量为 4.965GPa ,泊松比为 0.3275 ,密度为 1170kg/m^3 ,根据频散方程(5)可以得到该圆环周向导波群速度的频散曲线如图 1 所示。

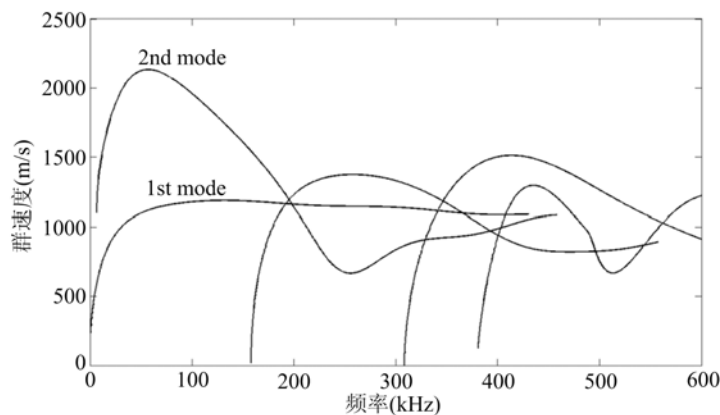


图 1 有机玻璃圆环周向导波群速度的频散曲线

Fig. 1 Group velocity dispersive curves of circumferential waves in a plexiglas annulus

从图 1 有机玻璃圆环周向导波的频散曲线可以看出:当频率低于 159kHz 时,周向导波只有两个模态;当频率大于 159kHz 时,模态增加到三个或三个以上。因此,选择频率低于 159kHz 的导波信号,可以控制在只有两个模态导波传播的略简单的情形。此外,图 1 还显示在低频的时候,前两个模态导波的群速度随频率的变化都非常显著。随着频率的提高,第一模态(1st mode)导波的群速度趋于平稳,但是第二模态(2nd mode)导波的群速度仍旧变化明显。因此,从理论上分析可以看出,选择 1st mode 导波群速度变化平缓的频带范围内的导波信息,可以去除弥散效应,进行缺陷定位应更准确。但是导波的多模态特性,使得采集到的导波信号往往包含多个模态叠加在一起的波动信息。只根据原始信号很难分

辨出导波的各个模态,也无法提取想要的频率进行分析,因此需要对信号进行处理。传统的波动信号处理是建立在傅里叶分析基础上的,可以得到信号的频域信息,却丢失了信号的时域信息,所以无法满足定量损伤检测的要求。小波变换法由于具有独特的局部化和自适应的时频分析特性,在复杂导波信号的处理上具有优势,因此得到了广泛应用。

1.2 Gabor 小波变换

与傅里叶变换类似,小波变换也是一种积分变换。它是将一个时间函数变换到时间-尺度相平面上。引入平方可积函数 $\psi(t)$, 如果其满足小波母函数的可容许性条件^[10]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \tag{6}$$

则称 $\psi(t)$ 是一个小波母函数。其中 $\hat{\psi}(t)$ 是 $\psi(t)$ 的傅里叶变换。

定义小波基函数为 $\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi(\frac{t-\tau}{a})$, 其中 a 是母函数的伸缩尺度因子; $\tau \in \mathbf{R}$, 为母函数的平移时移因子。对于任意平方可积信号 $f(t)$, 将其在连续小波基函数下展开就得到了连续小波变换的表达式:

$$Wf(a, \tau) = \langle f(t), \psi_{a,\tau}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi \frac{t-\tau}{a}} dt \tag{7}$$

选择何种具有良好时频特性小波母函数进行信号分析是非常重要的。通过 Heisenberg 不确定性原理, Gabor 和 Morlet 小波均具有很好的时频特征, 而根据文献[5]的研究表明, 与 Morlet 小波比起来, Gabor 小波具有更高的时间分辨率, 能更准确地判定波到达的时刻和缺陷的位置。因此, 本文采用 Gabor 小波变换为:

$$\psi_G(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma}} \exp\left[-\frac{\left(\frac{\omega_0}{\gamma}\right)^2}{2} t^2\right] \exp(i\omega_0 t) \tag{8}$$

$$\hat{\psi}_G(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{\gamma}{\omega_0}} \exp\left[-\frac{\left(\frac{\gamma}{\omega_0}\right)^2}{2} (\omega - \omega_0)^2\right] \tag{9}$$

其中 $\gamma = \pi \sqrt{2/\ln 2}$, $\omega_0 = 2\pi$ 均为常数, 其时域和频域图如图 2 所示。对于 Gabor 小波, 当 $\omega_0 = 2\pi$ 时, 伸缩尺度因子 a 满足 $a = 1/f$ ^[5], f 是小波变换提取的频率。

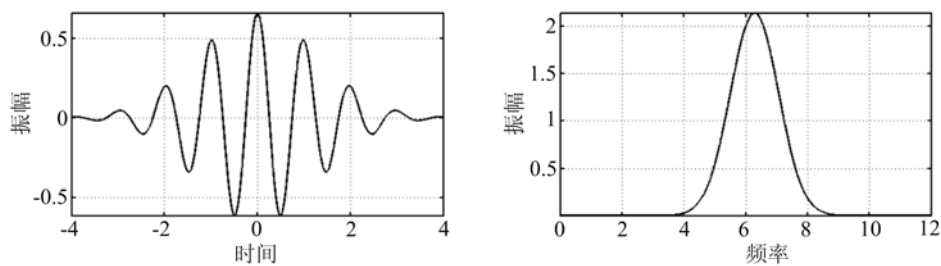


图 2 Gabor 函数的时域频域图

Fig. 2 Gabor function and its Fourier transform

根据文献[5]可以计算出 Gabor 小波的频率分辨率 $\sigma_{\omega} = 0.83$, 即对于单频 Gabor 小波变换, 其提取的频率 f 其实并不是一个特定的频率, 而是一个频率范围: $f \pm \Delta f$, 其中 $\Delta f = \frac{\sigma_{\omega}}{2\pi} \cdot f$ 。在小波提取的频率范围内, 导波群速度变化率的不同会影响损伤检测结果的精度。

2 数值模拟

2.1 激励脉冲和数值模拟

本文用 ABAQUS/Explicit 模块计算了无裂纹和有裂纹的有机玻璃圆环, 分别经历 9 种不同激励脉冲冲击后在 $500\mu s$ 内的应变响应。单元选用 S4R, 时间步长为 $10^{-7} s$ 。含裂纹的有机玻璃圆环模型

示意图见图3,其中圆环的材料和几何特性与图1对应的圆环相同。9种激励脉冲的时域和频域图分别如图4(a)、(b)所示。若定义幅值为最大幅值50%的两点对应的的时间差为脉冲宽度 ΔT ,则9种激励脉冲的脉冲宽度 ΔT 分别从 $2.25\ \mu\text{s}$ 到 $36\ \mu\text{s}$ 。从图4中可以看出,激励脉冲的时域宽度越窄,对应的频域范围越宽;反之,越宽的激励脉冲对应的频域范围越窄,且集中在低频段。

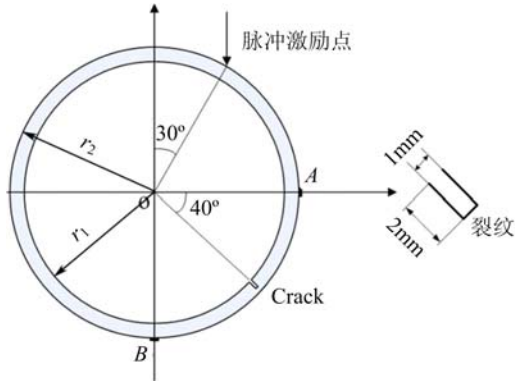


图3 含裂纹的有机玻璃圆环模型示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the annulus with a radial crack

2.2 动态应变信号的小波变换分析

为了确定圆环中径向裂纹的位置,首先需要计算周向导波在圆环中传播的波速。本文通过圆环外周上A点和B点(见图3)的切向动态应变信号来计算周向导波的波速。几种典型激励脉冲作用下A点和B点的动态应变信号如图5所示。通过分析波到达A点和B点的时间差以及A、B两点之间的距离可计算出波速,并进而通过分析波经过A点传播到裂纹再反射到A点的时间差,便可以根据波速确定裂纹的位置。

从图4可以看出,短时域的激励脉冲由于包含的频域宽,所以要比长时域激励脉冲包含更多模式的波,所以图5中 case1 情况下得到的动态应变信

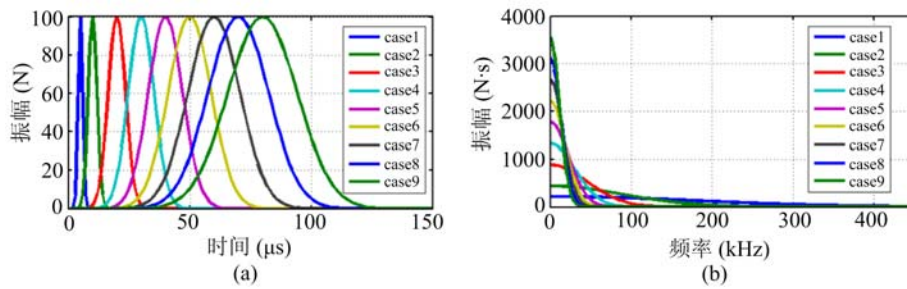


图4 9种脉冲载荷的时域图和频域图

Fig. 4 Time and frequency domains of 9 different excitation pulses

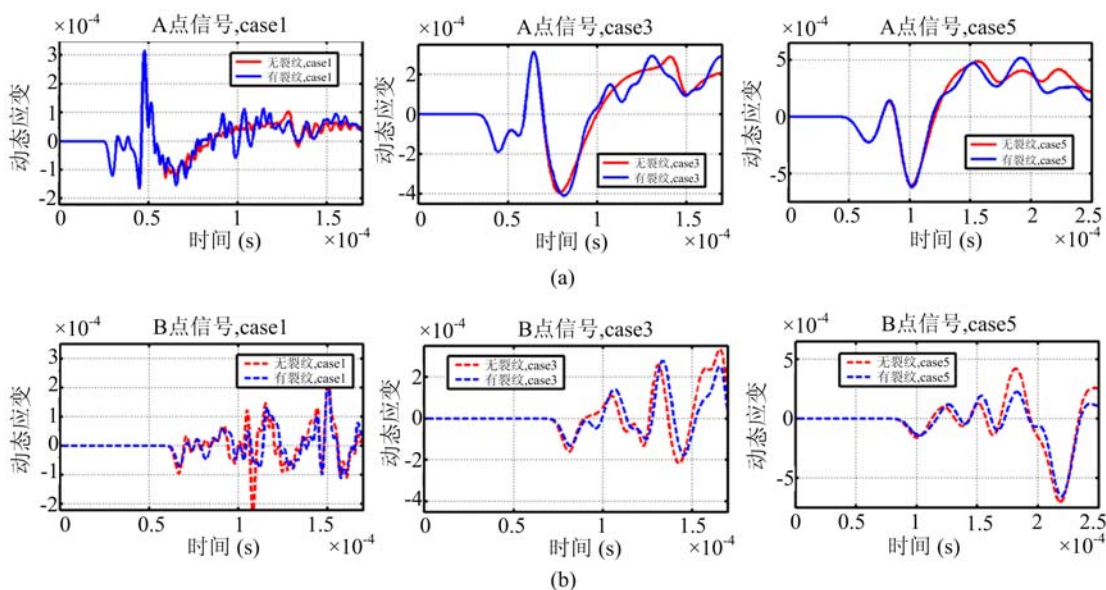


图5 A点和B点分别在 case1, case3 和 case5 作用下的动态应变(A点(a), B点(b))

Fig. 5 Dynamic strains at (a) point A and (b) point B under case 1, case 3 and case 5

号要比 case3、5 情况下得到的信号更复杂。而且,同种激励脉冲下 A 点和 B 点的动态应变信号差别很大(见图 5),这说明周向导波在圆环中传播时具有弥散性。因此,动态应变信号的多模态和弥散性质使得很难从中确定导波波速。此外,从图 5 中无裂纹和有裂纹的动态应变信号的比较可以看出,裂纹的存在增加了应变波形的波动,可以估计圆环中是否存在裂纹,但是无法准确确定裂纹的位置。

为了能够从复杂的应变信号中剔除多模态和弥散性质的影响,准确判断波的传播过程,本文采用 Gabor 小波变换从应变信号中提取合适的单频信息用于裂纹的定位检测。首先,我们分别对无裂纹和有裂纹情况下 A 点的应变信号进行了多频小波变换分析,几种典型激励脉冲下的应变信号变换图如图 6 所示。

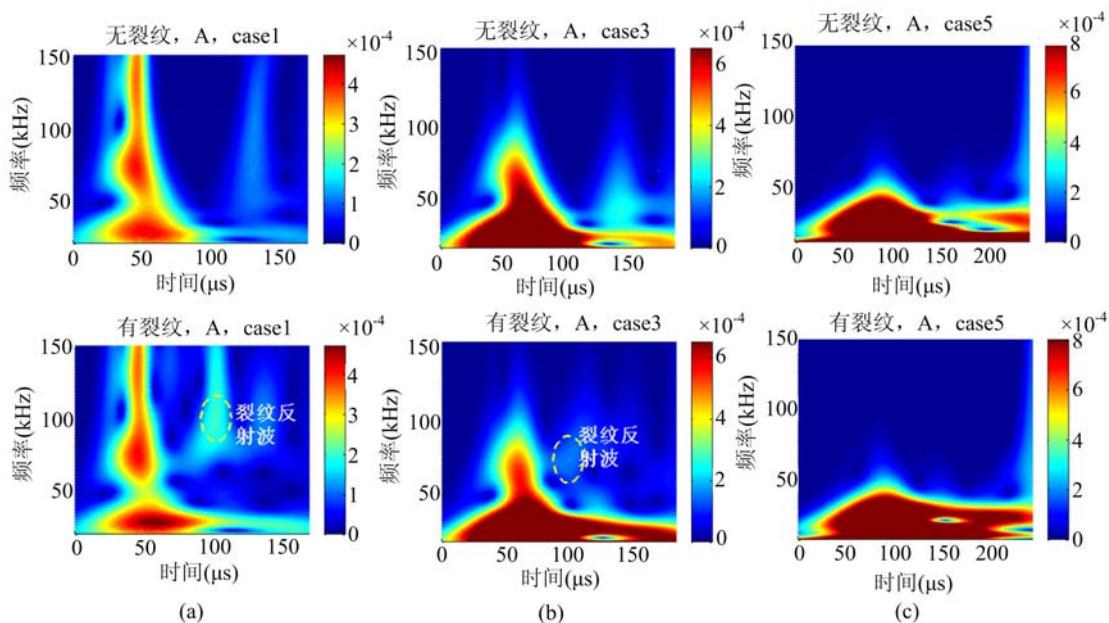


图 6 在 case1(a), case3(b), case5(c)作用下 A 点动态应变的多频小波变换图

Fig. 6 Multi-frequency CWT of strains at point A under (a) case 1 (b) case 2 and (c) case 5

对比图 6 中各个脉冲下无裂纹和有裂纹的多频小波变换图形可以看出,1st mode 导波的信号比 2nd mode 导波的信号强,且峰值明显,因此本文只考虑 1st mode 导波的信息。在 case1 的作用下,有裂纹的多频小波变换图形中比无裂纹的明显多出来一个波峰(用黄色虚线圈出)。这个附加的波峰即是由裂纹反射回来的波峰。我们观察发现这个波峰对应的频率在 100kHz 附近,所以可以采用单频小波变换提取 100kHz 附近的频率作为对缺陷敏感的频率,从而确定缺陷的位置。case2 和 case1 得到的结果类似。但是,从 case3 开始,这个附加的波峰已经开始变得很不明显;在 case5 的时候这个附加的波峰已经看不到了。

为了排除裂纹反射的信号太弱或反射信号和原信号发生重叠这两个因素,我们对有裂纹和无裂纹圆环 A 点动态应变的差信号做多频小波变换,结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,在 case1 作用下,由裂纹反射的波对应的波峰非常明显(用黄色虚线圈出),而且对应的单频小波变换频率很容易提取,和图 6 得到的结果一样,均在 100kHz 附近。但是,从 case3 开始,裂纹反射的波对应的波峰变得不明显,这就让准确提取对缺陷敏感的单频小波变换频率变得非常困难。而单频小波变换频率对缺陷敏感度的不确定性将对圆环中裂纹位置的确定产生很大的影响。同时这也表明激励脉冲宽度 ΔT 对提取对缺陷敏感的单频小波变换频率有很大的影响。B 点将采用与 A 点相同的单频小波变换频率来计算波速,所以本文未对 B 点信号做多频小波变换分析。

为进一步研究这种作用机理,首先提取了与各个脉冲对应的最优小波变换频率 f_r ,通过 f_r 确定的裂纹位置与真实位置的相对误差用 $|r|$ 表示。此外,还分析了若选取与 f_r 相差 $\pm 2\text{kHz}$ 的频率做小波变换确定的裂纹位置的相对误差 $|r^p|$,结果见表 1。

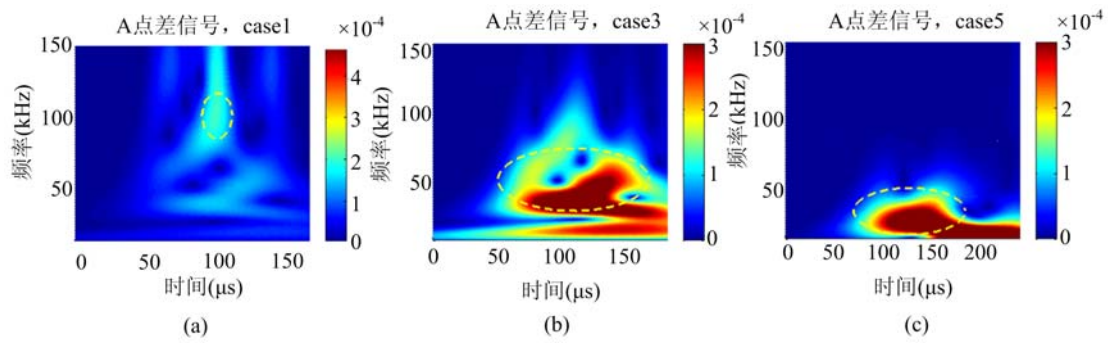


图7 A点有缺陷和无缺陷情况下动态应变差信号的多频小波变换图

Fig. 7 Multi-frequency CWT of different strains between damaged and healthy states at point A

表1 各个激励脉冲对应的最优小波频率及最优小波频率范围内群速度的变化

Tab. 1 The right CWT frequencies and changes of group velocities during these frequencies for corresponding excitation pulses

case	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΔT (μs)	2.25	4.5	9	13.5	18	22.5	27	31.5	36
$f_r \pm \Delta f_r$ (kHz)	101 ± 13.3	102 ± 13.5	45 ± 5.9	43 ± 5.7	46 ± 6.1	52 ± 6.9	29.5 ± 3.9	31 ± 4.1	34 ± 4.5
$ r $ (%)	1.99	1.38	1.95	0.65	1.43	0.49	2.35	1.26	2.57
$ r^p $ (%)	2.73	2.66	3.67	5.17	1.93	3.04	21.98	19.79	25.95
ΔC_{1g} (m/s)	17.6	17	48.2	51.8	50.4	42	61.9	65.7	60.5

由小波变换提取的频率 f 是一个频率范围,即 $f \pm \Delta f$ 。为了进一步分析脉冲宽度与导波信号的关系,我们将各个最优小波变换频率范围和导波在圆环中的频散曲线特征联系起来,分析出在各个频率范围内,1st mode 的导波对应的群速度的变化范围 ΔC_{1g} ,结果见表1。从表1还可以看出 ΔC_{1g} 也随着脉冲宽度的增加而增大。

对于激励脉冲1和2,提取最优频率 f_r 非常容易,而对于其它较宽脉冲激励方式,要准确选取最优频率 f_r 较困难。

从表1可以看出,当激励脉冲的脉冲宽度 ΔT 比较小时(如 case1、2),由 f_r 附近的频率确定的裂纹位置的相对误差仍旧很小;但是随着脉冲宽度的增加,通过 f_r 附近的频率确定的裂纹位置的精度开始有所降低(如 case4、5),有时还会出现相对误差比较大的情况。当 ΔT 进一步增加的时候(如 case7~9),提取的小波频率虽然和最优频率只是稍差一点,但得到的相对误差却非常大,确定的裂纹位置变得非常不准确。

2.3 激励脉冲与导波信号的关系

为了分析激励脉冲与导波信号检测损伤之间的关系,我们把各个激励脉冲包含的频域和小波提取的最优频率与导波群速度的频散曲线结合起来进行分析,如图8所示。图8中,横坐标是频率,左纵坐标是群速度,右纵坐标是最优小波变换频率的点在脉冲频域曲线中的幅值占该脉冲最大幅值的百分比 δ ,色带与右纵坐标对应,圆点的横坐标与各个脉冲下的最优频率 f_r 对应。图中每个脉冲对应的频带(脉冲频域曲线中幅值在10%~90%的频域)的颜色与各自的 δ 一致。case1和case2的频带范围分别到389kHz和193kHz,在图8中只显示了部分。裂纹定位过程中只用到了1st mode的波,所以图8只显示了1st mode波的群速度频散曲线。由于case6情况下的频带和case8、9有重叠,为了使图形更加

清晰,图8略去了 case6 的情况。为了分析激励脉冲的选取和导波群速度变化率的关系,我们给出 1st mode 波的群速度随频率的变化率,如图9所示。

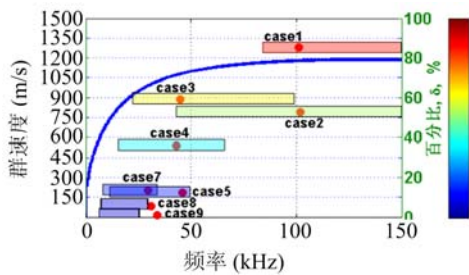


图8 各脉冲最优频率与波的群速度的频散曲线
Fig. 8 The right CWT frequencies for corresponding excitation pulses

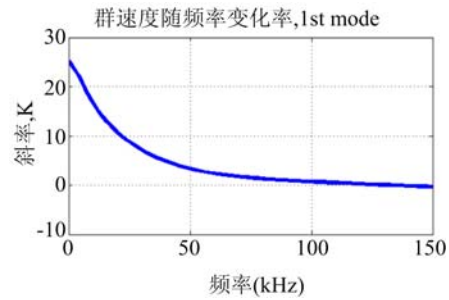


图9 1st mode 波的群速度随频率的变化率
Fig. 9 The rate of change of group velocity to frequency for 1st mode wave

从图8中可以得到:随着脉冲宽度 ΔT 的增加,脉冲频带越来越窄,最优小波变换频率的点在脉冲频域曲线中的幅值占该脉冲最大幅值的百分比 δ ,整体上呈现出逐渐减小的趋势。到 case8 和 case9 的时候, δ 甚至低于了 10%。这样随着 ΔT 的增加,最优小波变换频率 f_r 对应的波的峰值在多频小波变换图中将变得越来越不明显,准确提取 f_r 将越来越困难。此外,从图8和图9可以看出,在频率比较低的时候(低于 40kHz), 1st mode 波的群速度变化非常快,群速度对频率的变化率很大,此时频率上的稍微改变对应的群速度将有很大的变化。当频率逐渐增高时, 1st mode 波的群速度曲线趋于水平,群速度对频率的变化率比较小并逐渐趋于 0。此时频率上的稍微改变对群速度的影响将会很小或基本没有影响。因此,随着激励脉冲宽度的增加,频域范围变窄并集中在低频段,使得提取的小波频率越来越低,同时群速度的变化 ΔC_{1g} 也将逐渐变大(见表1),导致裂纹定位的精度降低(见表1)。

综上所述,在基于周向导波的损伤检测方法中,激励脉冲宽度对检测结果的精度有很大的影响,而如何选取合适的激励脉冲又和导波的弥散度密切相关。选择脉冲宽度小、频带宽、所含频率对应导波的群速度变化率小的激励脉冲进行损伤检测,易于实现缺陷的准确定位;相反,则会使缺陷定位变得非常困难。

3 实验分析

为了验证数值模拟得到的结果,本文分别用小球激励和压电片激励模拟了宽窄两种典型激励脉冲下的裂纹定位情况,并对结果进行了实验分析。

3.1 宽激励脉冲下的裂纹定位

为了模拟宽激励脉冲,本文用直径为 20mm 的钢球,从 1.2m 高的位置落下冲击有机玻璃圆环,圆环参数与数值模拟中的一样,冲击方向和位置见图3。沿周向分别在 A 点和 B 点贴应变片,并与超动态应变仪(SDY2107)连接,用 LeCroy[®] LC574AL 的示波器采集并记录 A、B 两点的动态应变信号。

对 A 点有裂纹和无裂纹时接收到的应变信号以及两者的差信号做多频小波变换如图10所示。

由图10可见,在时域比较宽的激励脉冲下,由于脉冲包含的频域范围比较窄,所以小波变换后的信号也多集中在低频区域。和数值模拟的结果一样,在宽脉冲激励下,裂纹反射信号对应的波峰不明显,通过对比有裂纹和无裂纹情况下的多频小波变换图很难提取对缺陷敏感的单频小波变换频率,而通过差信号的多频小波变换图也只能大概得到裂纹反射波的频率。在这个大概的频率附近提取几个频率做单频小波变换,得到的典型单频小波变换图如图11所示,确定的裂纹位置与真实位置的相对误差如表2所示。

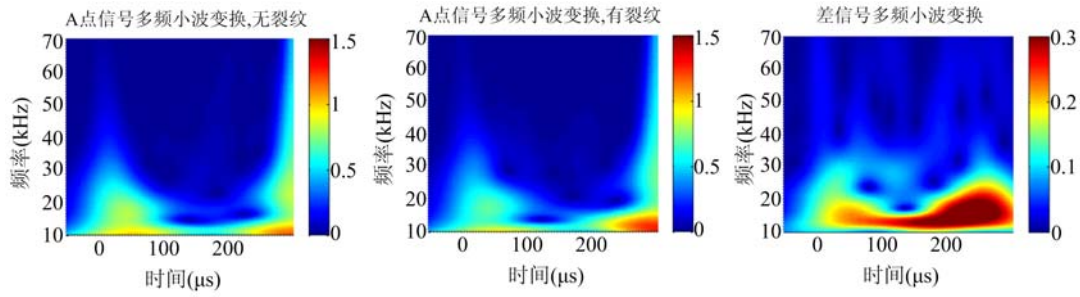


图 10 宽激励脉冲下 A 点信号的多频小波变换图

Fig. 10 Multi-frequency CWT of strains at point A under a broad pulse

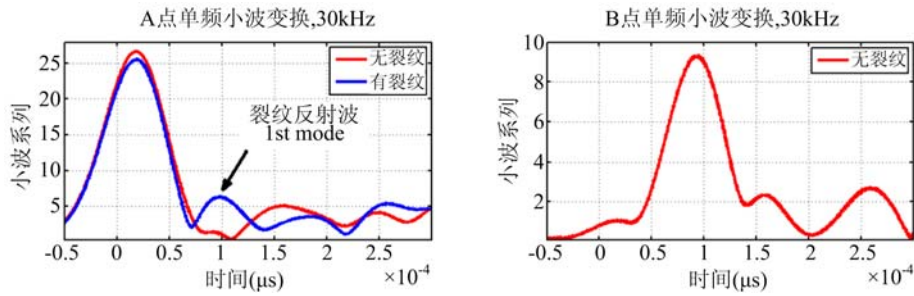


图 11 宽激励脉冲下 A、B 点信号的 30kHz 单频小波变换图

Fig. 11 CWT of strains at 30kHz at points A and B under a broad pulse

表 2 宽激励脉冲下确定的裂纹位置与真实位置的相对误差

Tab. 2 Relative errors between estimated crack locations and the real location at different CWT frequencies under the broad pulse

$f(\text{kHz})$	30	32	34	36
$ r (\%)$	19.87	15.79	7.07	11.19

从表 2 可见,当小波变换提取 34kHz 频率时,确定的裂纹位置误差为 7.07%,误差在可以接受的范围内,可认为 34kHz 是对缺陷敏感的频率;但是当提取 34kHz 附近的频率时,虽然提取的频率和 34kHz 相差很小,但得到的误差却都非常大。这说明在低频范围内,1st mode 波的群速度会有很大波动,导致虽然提取的小波频率和对缺陷敏感的频率相差很小,但是最终确定的裂纹位置的误差却非常大。这一点和数值模拟的结论一致。

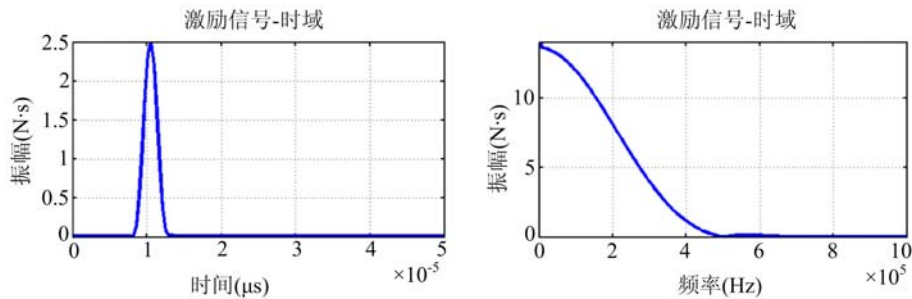


图 12 窄激励脉冲的时域频域信号

Fig. 12 Time and frequency domains of the narrow pulse

3.2 窄激励脉冲下的裂纹定位

为了得到窄时域的激励脉冲,本文用压电圆片进行激励。压电圆片直径 8mm,厚度 1mm,激励的脉冲信号由 DG1022 任意函数信号发生器产生,激励信号的时域和频域图如图 12 所示。本实验中我们

采用 PSV-400 多点扫描式激光测振仪测量并采集圆环中 A 点和 B 点(如图 13 所示)的径向位移信号, 采样频率为 2560kHz。

对 A 点有裂纹和无裂纹时接收到的信号做多频小波变换, 如图 14 所示。由图可见, 对于压电片激励的窄时域脉冲, 由于脉冲包含的频域范围很宽, 所以小波变换后的信号包含的频带范围也很宽, 且裂纹反射信号对应的波峰也比较明显。同数值模拟的结果一样, 对比有裂纹和无裂纹情况下的多频小波变换图很容易发现裂纹反射波对应的波峰, 也就非常容易提取对缺陷敏感的单频小波变换频率。压电片激励方式产生的导波集中在较高频率范围, 裂纹反射波对应的频率范围大概在 140~150kHz 之间。在 140~150kHz 范围内任意提取几个频率做单频小波变换, 得到的典型变换图如图 15 所示, 确定的裂纹位置与真实位置的相对误差见表 3。

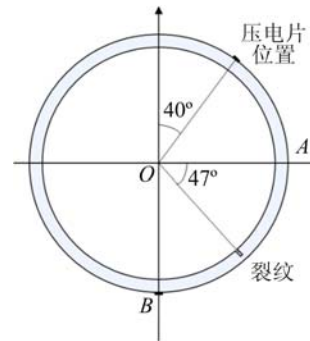


图 13 窄脉冲激励实验示意图

Fig. 13 Schematic diagram of PZT excitation

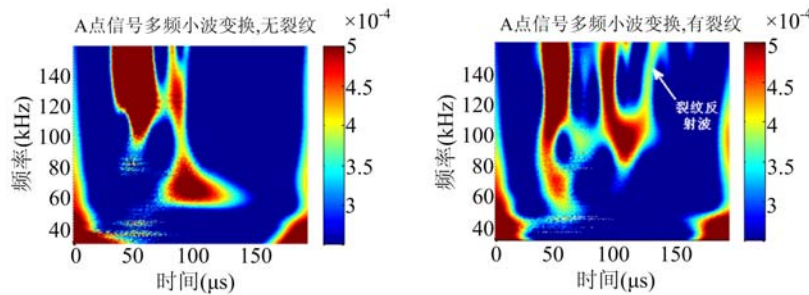


图 14 窄激励脉冲下 A 点信号的多频小波变换图

Fig. 14 Multi-frequency CWT of strains at point A under a narrow pulse

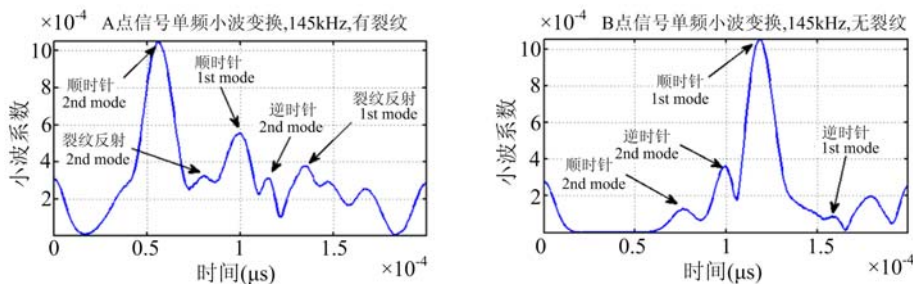


图 15 窄脉冲激励下 A、B 点信号 145kHz 单频小波变换图

Fig. 15 CWT of strains at 145kHz at points A and B under a narrow pulse

表 3 窄激励脉冲下确定的裂纹位置与真实位置的相对误差

Tab. 3 Relative errors between estimated crack locations and the real location at different CWT frequencies under the narrow pulse

$f(\text{kHz})$	140	145	147	149
$ r (\%)$	5.34	4.26	3.24	3.21

从图 15 可以发现压电片所激励的导波形式比图 3 模型激励的导波形式复杂, 分别会有双向周向导波同时传播。从表 3 可见, 在 140kHz~150kHz 之间提取的几个频率确定的裂纹位置的误差最大为 5.34%, 最小为 3.21%, 均要比宽脉冲激励下得到的误差小。如果把 149kHz 看成最优频率, 那么从图 9 可以发现最优频率附近的 1st mode 波的群速度随频率的变化率很小, 因此确定裂纹位置误差都不大。

这和数值模拟的结果是一致的。

由此可见,在窄激励脉冲下,对缺陷敏感的频率对应的频率较高、幅值较大,裂纹反射信号对应的波峰在多频小波变换图中非常明显,且1st mode波的群速度变化很小。因此,只要采用小波变换提取的频率在最优频率附近,均可以比较准确地确定裂纹的位置。

4 结论

本文通过数值模拟和实验方法研究了多种不同激励脉冲宽度对基于导波的圆环损伤检测精度的影响,发现1st mode波是检测径向裂纹最适用的模式导波,并结合圆环的频散曲线分析了测试误差产生的机理,得出以下结论:

(1) 随着激励脉冲宽度的增加,裂纹反射的波峰在信号的多频小波变换图中越来越不明显,使得通过有裂纹和无裂纹时信号的多频小波变换图提取对损伤敏感的频率的信息变得越来越困难;

(2) 在很窄时域脉冲下,小波变换提取最优频率附近的频率信息仍有较好的确定的裂纹位置的精度;但随着激励脉冲宽度的增加,通过最优频率附近的频率信息确定裂纹位置的精度有所降低;当激励脉冲的时域很宽时,采用提取的小波频率和最优频率稍差一点,结果的相对误差就会非常大;

(3) 随着脉冲宽度的增加,脉冲频带越来越窄,对损伤敏感的最优小波变换频率信息的幅值也越来越弱;

(4) 在频率比较低的时候,1st mode波的群速度变化非常快,群速度对频率的变化率很大;当频率逐渐增高时,1st mode波的群速度曲线趋于水平,群速度对频率的变化率比较小并逐渐趋于0;所以随着激励脉冲宽度的增加,可提取的小波频率越来越低,群速度的变化逐渐增大,导致裂纹位置确定的精度逐渐降低;

(5) 选择脉冲宽度小、频带宽的激励脉冲进行损伤检测,使得导波的群速度变化率小,易于实现缺陷的准确定位;相反,则会使缺陷定位变得非常困难。

本文提出的基于周向导波的圆环损伤检测方法,为其在实际工程当中的应用提供了参考。另外,导波在薄板、壳等结构中也具有相似的频散特性,不仅适用于薄壁环状和管装结构的径向裂纹的检测,而且有关导波信息的小波变换处理与裂纹定位精度的分析方法,可以推广应用于类似的多模态、弥散的导波信息的分析中,如工程中常见的板、壳等结构,为结构损伤的定量评估提供了一种可靠的检测技术。

参考文献:

- [1] 吴斌,刘增华,王秀彦,何存富. 利用纵向导波检测充水管道周向缺陷的实验研究[J]. 中国机械工程, 2005(22): 2038—2043 (Wu Bin, Liu Zenghua, Wang Xiuyan, He Cunfu. Experimental study on circumferential defect in water-filled pipe using longitudinal guided waves[J]. China Mechanical Engineering, 2005(22): 2038—2043 (in Chinese))
- [2] Rose J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. Cambridge University Press, 1999.
- [3] 吴斌,禹建功,何存富. 正交各向异性空心圆柱体中的周向超声导波[J]. 工程力学, 2007, 24(8): 37—42 (Wu Bin, Yu Jianguo, He Cunfu. Guided circumferential waves in orthotropic hollow cylinders[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(8): 37—42 (in Chinese))
- [4] Liu G, Qu J. Transient wave propagation in a circular annulus subjected to transient excitation on its outer surface [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1998, 104: 1210—1220.
- [5] Yu Liu, Zheng Li, Wei Zhang. Crack detection of fiber reinforced composite beams based on continuous wavelet transform[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2010(25), 25—44.
- [6] Fan W, Qiao P Z. A 2-D continuous wavelet transform of mode shape data for damage detection of plate structures [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009(46): 4379—4395.
- [7] Gokdag H, Kopmaz O. A new damage detection approach for beam-type structures based on the combination of continuous and discrete wavelet transforms[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009(324): 1158—1180.
- [8] 励争,夏书满,王君. 薄壁管道内部径向裂纹的检测[J]. 机械强度, 2004, 26(6): 642—646 (Li Zheng, Xia

- Shuman, Wang Jun. Detection of the radial crack in a thin walled tube[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(6): 642—646(in Chinese)
- [9] Liu G, Qu J. Guided circumferential waves in a circular annulus[J]. J. Appl. Mech, 1998 (65): 424—430.
- [10] Chui C K. An introduction to wavelets[M]. Mew York: Academic Press, 1992.

Influence of Excitation Pulse Signal on Circular Ring Damage Detection Based on Guided Circumferential Wave

LI Bing, LI Zheng, LIU Yu

(State Key Laboratory of Turbulence and Complex System, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: This paper presents the results of investigation on the influence of different excitation pulse signals on the damage detection of circular ring with radial crack based on guided circumferential waves. Circular rings without crack or with radial crack were acted by excitation pulses with different pulse duration, then, strain signals were numerically calculated by ABAQUS program. These data were processed by continuous wavelet transform (CWT) to locate the radial crack. Results show that the pulse duration has strong influence on the accuracy of damage location. According to group velocity dispersive curve of rings, the crack position location was discussed. Finally, to verify the right selection of pulse duration in the damage detection, two experiments were carried out. Both experiments present the same results.

Keywords: excitation pulse; guided circumferential wave; radial crack; Gabor wavelet; damage detection