

接触缺陷的振动调制超声导波检测技术研究^{*}

焦敬品 何存富 吴斌

(北京工业大学机电学院 北京 100124)

B. W. Drinkwater S. A. Neild P. D. Wilcox

(Department of Mechanical Engineering, University of Bristol Bristol, BS8 1TR, UK)

2008 年 10 月 8 日收到

2008 年 12 月 28 日定稿

摘要 针对常规线性超声检测方法无法实现板结构接触类缺陷(如微裂纹、脱粘等)检测问题,将超声导波技术与振动声调制技术相结合,利用稀疏分布传感器发展了一种板结构中接触缺陷非线性超声检测方法。通过低频振动改变缺陷的接触状况,使得通过接触面的高频导波信号的相位和幅值受到调制。对受低频振动调制的超声导波二维时间序列进行时频分析,由于接触类缺陷的存在,在振动调制超声导波序列的时频分布上出现明显的低频振动频率分量。利用提取出的低频振动频率下的超声导波信号,进行了结构接触缺陷成像处理。检测试验表明,基于振动声调制的超声导波缺陷成像方法可以实现结构中的接触类缺陷检测。

PACS 数: 43.25, 43.35

Vibro-modulation and guided wave techniques for contact defect detection in plate

JIAO Jingpin HE Cunfu WU Bin

(Department of Mechanical Engineering, Beijing University of Technology Beijing 100124)

B. W. Drinkwater S. A. Neild P. D. Wilcox

(Department of Mechanical Engineering, University of Bristol Bristol, BS8 1TR, UK)

Received Oct. 8, 2008

Revised Dec. 28, 2008

Abstract To solve the contact defect (such as cracks, delaminations) detection in structures, a nonlinear acoustic technique for detection of contact defects in plates using sparsely distributed sensors was developed associating guided waves with vibro-modulation techniques. The low frequency vibration varies the interface area within the contact defect; therefore the amplitude and phase of high frequency guided waves reflected from the contact defect will be modulated. Due to the existing of contact defects, there is obvious low frequency component in the time-frequency distribution of modulated guided wave series. Furthermore the nonlinear responses at frequency of vibration are extracted out and used for defect imaging. It is shown that the nonlinear guided wave imaging method based on vibration modulation can effectively characterize and locate the nonlinear contact defects.

引言

超声导波技术因其检测效率高、速度快,可实现结构大范围、长距离检测等特点,已经广泛应用于结

构健康监测。基于利用最少的传感器数量实现最大范围检测的理念,稀疏分布式传感器阵列高效地实现了板结构中线性缺陷(如孔)的健康监测^[1-6]。但对于工程结构中普遍存在的、极具危害性的接触缺

^{*} 国家自然科学基金(10772008)、北京市科技新星项目(2007B012)和北京市教委项目(KM200810005009, KZ20081000501)资助。

陷检测，如微裂纹、脱粘、剥离等，常规线性超声检测技术则无能为力。接触类缺陷的基本特征是具有一个接近闭合或者相互接触的界面。大量的理论分析和试验研究表明，超声波在传播到裂纹等非完好界面缺陷时会产生异常高的非线性^[7-13]。这种非线性的一个典型声学表征为高频信号被低频振动的调制，即所谓的振动声调制技术。在低频振动作用下，缺陷的接触状况发生改变，使得通过接触面的高频声信号的相位和幅值受到调制。在频域中，振动声调制可以表现为在高频超声信号的频谱中出现对应的低频振动频率分量(旁瓣)^[14-18]。

基于高频信号中旁瓣分量的特征信息，人们将振动声调制技术应用于不同结构中裂纹缺陷的检测试验研究。Zaitsev^[14]利用交叉调制技术对裂纹缺陷进行了检测。通过在试件的谐振频率处进行高效能低频激励，提高了缺陷调制信号的旁瓣水平。Duffor^[15]系统研究了钢制梁中振动声调制信号的旁瓣水平与裂纹形状及大小的关系。研究发现，裂纹大小和振动调制强度的关联性不大。Donskov^[16-18]利用振动声调制技术对金属、塑料和复合材料结构中的疲劳和应力腐蚀裂纹缺陷进行了检测研究。试验研究发现，应力腐蚀裂纹的非线性响应超过 30 dB。Kim^[19-20]利用低频振动调制的脉冲表面波对试件中局部闭合疲劳裂纹进行了检测。利用线性分布的传感器阵列，Kazakov^[21-23]从受低频振动调制的高频脉冲序列中，提取出振动频率下高频超声信号的非线性响应，利用沿垂直于检测方向密集排列的传感器阵列发展了一种非线性缺陷成像方法。检测试验表明，该方法对非线性缺陷具有更高的敏感性。

本文利用类似于文献 21—文献 23 中的低频连续振动和高频脉冲序列信号，对板结构中非线性缺陷进行了检测试验研究。对受振动调制的超声导波二维时间序列信号进行了时频分析，利用提取出的低频振动频率处的超声导波的非线性时间响应，利用稀疏分

布传感器发展了一种板结构中振动调制超声导波缺陷成像方法。

1 振动调制导波检测试验系统

本文的振动调制超声导波检测试验在一块厚度为 3 mm, 尺寸为 750 mm×550 mm 的铝板上进行，试验装置如图 1 所示。

以直径 12 mm 高度 12 mm 铜圆柱体作为模拟缺陷。把铜柱被粘贴在铝板上(采用改性丙烯酸脂胶粘剂)，当它与板之间为完好接触时，可作为一种线性缺陷；而当铜柱在未粘贴、承载重物条件下被放置在铝板上时，它与板之间为未完好接触，可被看作为一种接触性缺陷(非线性缺陷)。不同承载下振动声调制检测试验发现，载荷过大或过小，振动声调制的现象都不明显。当载荷为 20 N 时，振动声调制现象比较明显，因此本文试验中接触缺陷的承载重量均采用 20 N。

振动调制超声导波接触缺陷检测系统主要包括低频振动和高频超声的激励接收两部分，其检测系统组成如图 2 所示。其中低频振动激励接收过程主

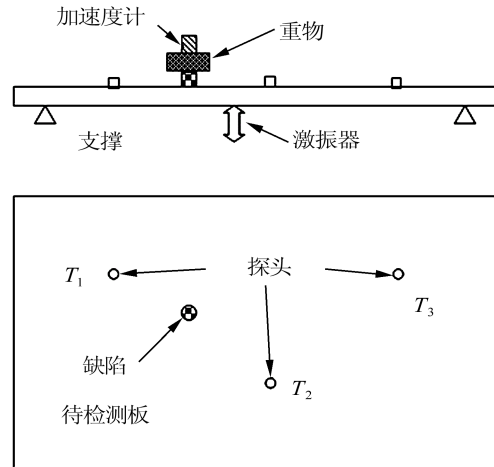


图 1 试验装置简化图

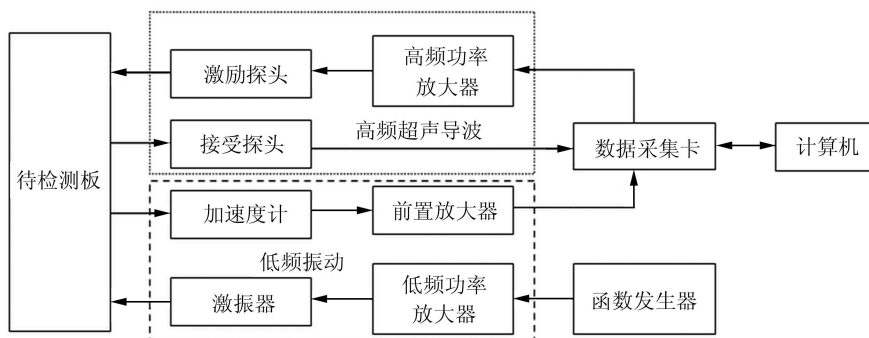


图 2 振动调制超声导波检测系统框图

要包括, 频率为 f_0 的低频谐波经功率放大后, 由低频激励器施加到板的中部, 引起板的弯曲振动。板的低频振动被固定在缺陷附近的加速度传感器拾取。在不同低频振动频率下 (45 Hz 范围内), 进行振动调制超声导波效果对比试验。研究发现, 由于低频振动频率的变化, 板振动幅度明显不同, 对应的振动调制导波效果也不同。检测试验最终选择在板振动幅度最大的低频振动频率 $f_0 = 20$ Hz 处进行。在本文的检测试验中, 板低频振动加速度的幅度为 3.5 m/s^2 。

高频超声信号的激励接收由分布粘贴在板表面的直径 3 mm 厚度 3 mm 的 3 片压电陶瓷片完成 (采用氰基丙烯酸酯粘贴)。激励信号为 5 个周期的汉宁窗调制的脉冲信号, 其中心频率为 200 kHz。在低频振动一周期 $T_0 = 1/20 = 0.05 \text{ s}$ 内, 高频脉冲信号的重复次数选择 10 次。同时考虑到检测系统的响应时间以及延迟, 高频超声导波序列的重复周期 $T_R = 10T_0 + (T_0/10) = 0.505 \text{ s}$ 。高频脉冲信号经功率放大后, 施加在某一压电陶瓷片, 在板中激励出超声导波信号。在板内传播的超声导波信号被其它两片压电陶瓷片接收, 经采样后存储于计算机, 以便于后续分析处理。试验中采用的压电陶瓷片为厚度伸缩型, 其施加载荷为垂直板面方向, 产生的位移以垂直板面位移为主, 激励的导波模态也以反对称的 A_0 模态为主。在本文研究中, 认为检测波形中回波信号只有 A_0 模态导波, 压电陶瓷片激励出的少量其它模态导波 (如 S_0) 以及在缺陷处由于模态转换产生的其它模态导波都忽略不计。

振动调制超声导波缺陷检测试验过程可简述如下。根据声互易原理, 粘贴在板上的 3 个压电陶瓷片 T_1, T_2 和 T_3 (其坐标分别为 (415,190), (196,190), (332,386)), 可以组成三对传感器: ($T_1 - T_2$), ($T_1 - T_3$) 和 ($T_2 - T_3$), 进行超声导波的激励接收。利用三对传感器分别进行无缺陷、线性缺陷以及非线性缺陷下板中超声导波检测试验; 在板上施加低频振动条件下, 分别进行带有线性缺陷和非线性缺陷的振动调制超声导波检测试验。

2 信号处理基本方法

作为本文非线性超声导波缺陷成像技术的基础, 需要首先对板结构中线性导波成像方法和振动声调制信号的解调方法进行介绍。

2.1 基于稀疏传感器阵列的板结构超声导波成像方法

本文应用的超声导波缺陷成像方法与文献 1 —

文献 6 叙述方法类似。对第 j ($j = 1, 2, 3$) 传感器接收到的超声导波信号 $x_j(t)$ 进行多次采集平均去噪后, 通过中心频率为 200 kHz 的高斯窗滤波器进行滤波处理。滤波后信号 $x'_j(t)$ 按照激励接收传感器的距离进行归一化处理, 其中第一对传感器接收信号中首次到达的 A_0 模态幅度为 1 (此种传感器模式下, 激励接收超声导波以 A_0 模态为主):

$$\bar{x}_j(t) = \frac{x'_j(t)}{A_j} \sqrt{\frac{d_1}{d_j}}, \quad (1)$$

其中 A_j 为第 j 对传感器的首次到达 A_0 模态导波的幅度, d_1 和 d_j 为第 1 对和第 j 对传感器的距离。

由于阻尼损失和声束扩散, 导波信号的幅度随传播距离增加而减小, 且声波幅度的减小率与传播时间的平方根成正比^[1]。因此, 导波信号的传播衰减可以通过下式进行补偿:

$$\hat{x}_j(t) = \bar{x}_j(t)\sqrt{t}. \quad (2)$$

对于第 j 对传感器, 空间任意位置处 (x, y) 对应的反射信号幅度 $I_j(x, y)$ 可以利用归一化信号 $\hat{x}_j(t)$ 的希尔伯特包络 $h_j(t)$ 表示为:

$$I_j(x, y) = h_j\left(\frac{d_j}{c_g}\right), \quad (3)$$

其中 c_g 为 A_0 模态导波在中心频率处的群速度。 d_j 为经过 (x, y) 由激励传感器 (x_j^T, y_j^T) 传播到接收传感器 (x_j^R, y_j^R) 的超声波的传播距离, 它可以表示为:

$$d_j = \sqrt{(x_j^T - x)^2 + (y_j^T - y)^2} + \sqrt{(x_j^R - x)^2 + (y_j^R - y)^2}, \quad (4)$$

其中: (x_j^T, y_j^T) 和 (x_j^R, y_j^R) 为激励和接收传感器的坐标。

三对传感器的反射信号幅度空间分布可以合成为结构整体的反射信号幅度的二维分布图,

$$I(x, y) = \sum_{j=1}^3 h_j\left(\frac{d_j}{c_g}\right). \quad (5)$$

为了减小结构中固有特征反射体回波 (如端面回波) 对检测结果的影响, 通过将检测信号与无缺陷参考信号相比较的方法, 剔出或减小检测信号中结构固有特征体反射信号, 使得缺陷反射信号突显出来, 从而实现缺陷检测的目的。最简便的方法是直接将它们进行求差运算:

$$I_{\text{Dif}}(x, y) = I_{\text{Def}}(x, y) - I_{\text{Baseline}}(x, y), \quad (6)$$

其中: $I_{\text{Baseline}}(x, y)$ 和 $I_{\text{Def}}(x, y)$ 分别是无缺陷和有缺陷情况下结构的反射信号幅度空间分布, $I_{\text{Dif}}(x, y)$

为两者之差，它可以进一步用 dB 表示为：

$$I_{Res}(x, y) = -20 \log \left\{ \frac{|I_{Def}(x, y) - I_{Baseline}(x, y)|}{\max[I_{Baseline}(x, y)]} \right\}. \quad (7)$$

按照公式 (7)，对未施加低频振动下，有缺陷和无缺陷超声导波检测信号进行处理，得到线性超声导波成像结果，如图 3 所示。图中矩形框“□”为缺陷的实际位置，符号“+”表示传感器位置。可以看出，利用常规的超声导波成像方法，可以实现线性缺陷（粘贴缺陷）检测，而无法实现非线性缺陷（承载 20 N）检测。

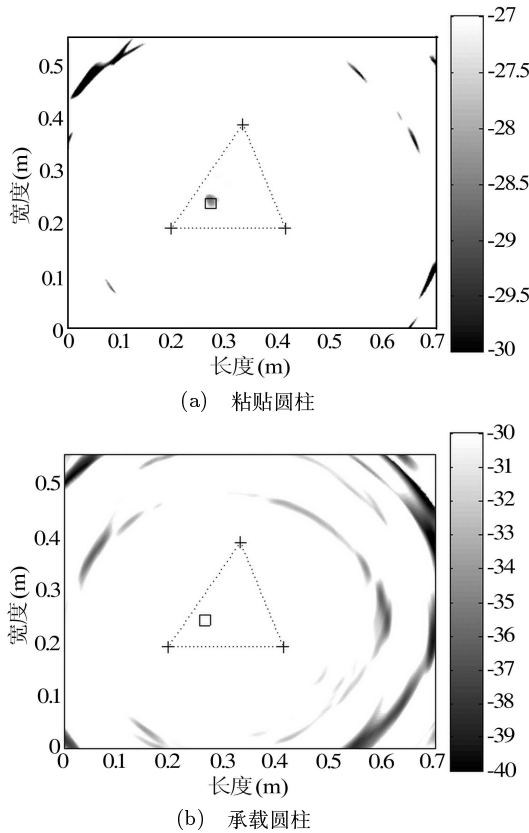


图 3 超声导波线性检测方法结果

2.2 基于时频分析的振动声调制信号解调方法

下面通过对模拟振动声调制信号的时频分析，揭示振动声调制的基本内涵以及信号的解调方法。假设在高频脉冲激励单独作用下，传感器接收到的高频超声信号为 $f(t)$ ，其波形如图 4 所示，并假设两回波均为结构接触缺陷反射信号。

如果在结构中同时施加一连续低频振动 $g(t) = A_0 e^{i2\pi f_0 t}$ ，其中振动频率 $f_0 = 20$ Hz， A_0 为其幅度。根据振动声调制原理，如果结构中存在接触类缺陷，则低频振动信号与高频超声信号要产生相互作用，高频超声信号将会被低频振动信号所调制。在低频振动不同时刻处 $\tau = \frac{T_0}{10} n (T_0 = \frac{1}{f_0}, n = 1, 2, \dots, 512)$ ，

受调制的高频超声信号可表示为^[21]：

$$y(\tau) = A_0 e^{i2\pi f_0 \tau} f(t). \quad (8)$$

显然，受振动调制的高频脉冲信号 $y(\tau)$ 为二维时间序列，其图形表示如图 5 所示。该二维时间序列信号可进一步简化为：

$$y_n(t) = A_0 e^{i\frac{n\pi}{5}} f(t). \quad (9)$$

对受振动调制的高频脉冲二维时间序列 $y_n(t)$ 进行同步锁相解调处理，即在高频脉冲序列的各采样点 $t = t_m$ 处（锁相）进行傅里叶变换处理：

$$A_{ml}(t_m, fl) = \sum_{n=1}^N y_n(t_m) e^{-i2\pi fl n\tau}, \quad (10)$$

其中 m 是每一脉冲序列的采样点数， l 为傅里叶变换点数。实际上， $A_{ml}(t_m, fl)$ 是对二维时间序列每一同相位点进行一维离散傅里叶变换的结果，是受振动调制高频脉冲序列的一种时频表示。显然，其信号处理过程与传统一维时间信号时频变换明显不同。但可以利用时间序列的二维时频分布 $A_{ml}(t_m, fl)$ 来表示受调制高频脉冲序列在各时刻的频率分布情况。图 6 为对图 5 所示模拟收振动调制高频脉冲序列进行锁相解调处理结果。可以看出，由于接触缺陷的存在，低频振动对高频超声信号产生调制作用。在高频脉冲序列的时频分布图中，这种调制作用表现为出现明显的低频振动频率分量（20 Hz）。

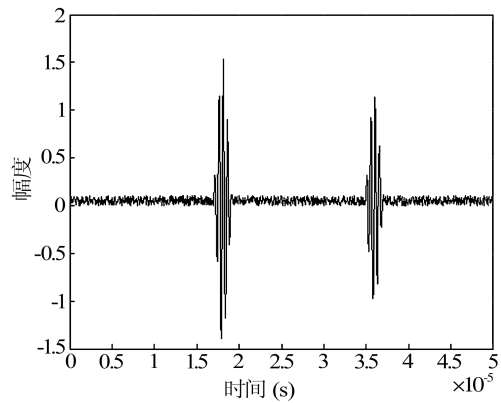


图 4 模拟高频超声信号波形

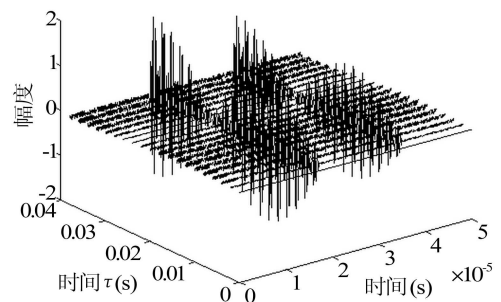


图 5 受调制高频超声脉冲序列

将低频振动频率 (20 Hz) 处高频超声信号与其它频率处高频超声信号进行对比可以发现, 高频超声信号在低频振动频率处具有最大的幅度, 典型对比如图 7 所示。因此, 低频振动频率下高频超声信号携带有更多的结构缺陷特征信息, 更适合于结构超声无损检测。

根据振动声调制原理, 如果结构中不存在接触类缺陷 (非线性缺陷), 高频超声信号与低频振动信号将不会产生相互作用, 其产生声场为各自独立产生声场的叠加。与振动调制高频脉冲序列处理过程相似, 对低频振动与高频超声叠加声场序列按照式 (10) 进行

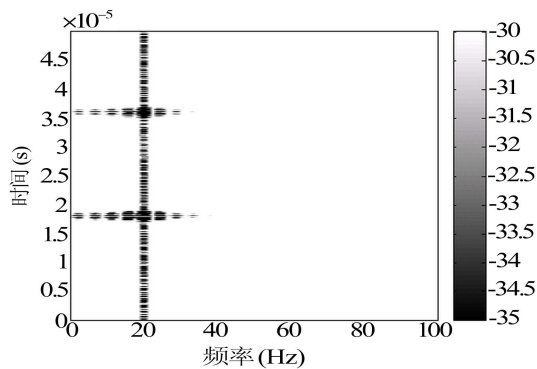
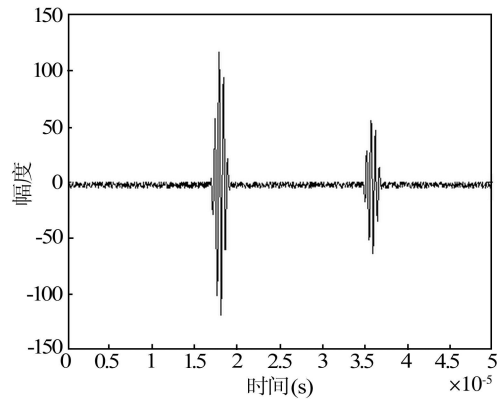
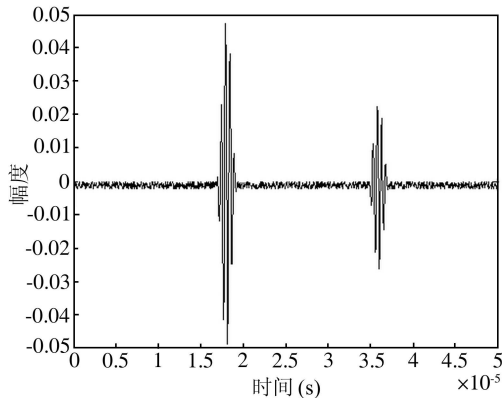


图 6 接触缺陷下, 受调制高频超声脉冲序列的时频分布



(a) 20 Hz



(b) 50 Hz

图 7 不同频率分量下提取出的高频脉冲信号波形

时频分析, 得到其时频分布如图 8 所示。从中可以看出, 低频振动与高频超声叠加声场的时频分布中, 只存在直流频率分量的高频超声信号, 在低频振动频率下不存在明显的高频超声信号。

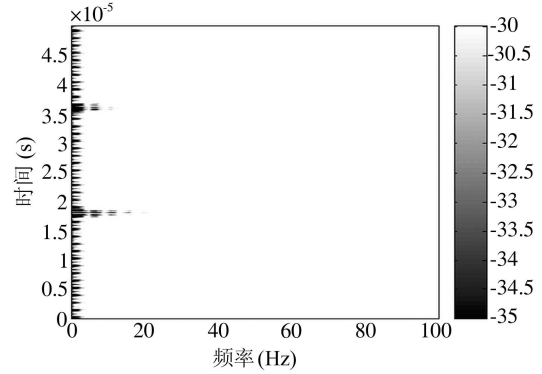


图 8 线性缺陷下, 叠加高频脉冲序列时频分布。

3 振动调制超声导波缺陷成像方法

由以上分析可以看出, 由于接触 (非线性) 类缺陷的存在, 高频超声信号将会被低频振动所调制, 在高频超声序列信号的时频分布图上表现为低频振动分量的出现。并且低频振动频率下高频超声信号携带有更多的结构缺陷特征信息, 更适合于结构超声无损检测。因此, 可以利用提取出的低频振动频率处的高频导波非线性响应, 进行缺陷成像处理, 得到一种低频振动调制超声导波的成像方法。

按照公式 (10), 对振动调制超声导波检测试验接收到的高频超声序列进行锁相解调处理, 得到如图 9 所示的时频分布图。其中, 图 9(a) 为带有非线性接触缺陷 (承载圆柱) 检测结果的时频分布, 从中可以清晰观察到低频振动频率分量的存在。图 9(b) 为带有线性缺陷 (粘贴圆柱) 检测结果的时频分布, 从中无法观察到低频振动频率分量的存在。同时, 在图 9(a) 中除了低频振动频率分量外, 还明显观察到其它低频分量成分。主要原因为: 板的低频弯曲振动并非理想的单频简谐振动, 还包含有其它低频振动分量。通过对压电加速度计检测信号的波形和频谱分析, 也证明了板结构弯曲振动的复杂性。

根据低频振动调制超声导波的成像方法, 从振动调制超声导波序列的时频分布中提取出低频振动频率 20 Hz 处的超声导波信号后, 按照式 (7) 进行缺陷成像, 成像结果如图 10 所示。图 10(a) 为非线性接触缺陷 (承载圆柱) 的检测结果, 可以清楚显示出接触缺陷的位置。从图 10(b) 为线性缺陷 (粘贴圆柱) 的检测结果, 在缺陷位置处无明显反射信号存在。因此, 该方法无法实现线性缺陷 (粘贴圆柱) 的检测。

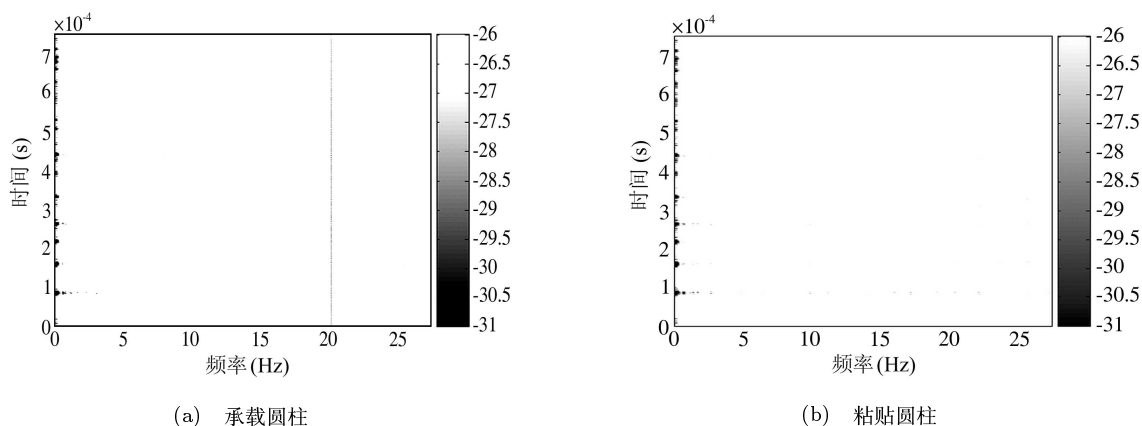


图 9 试验检测导波脉冲序列的时频分布

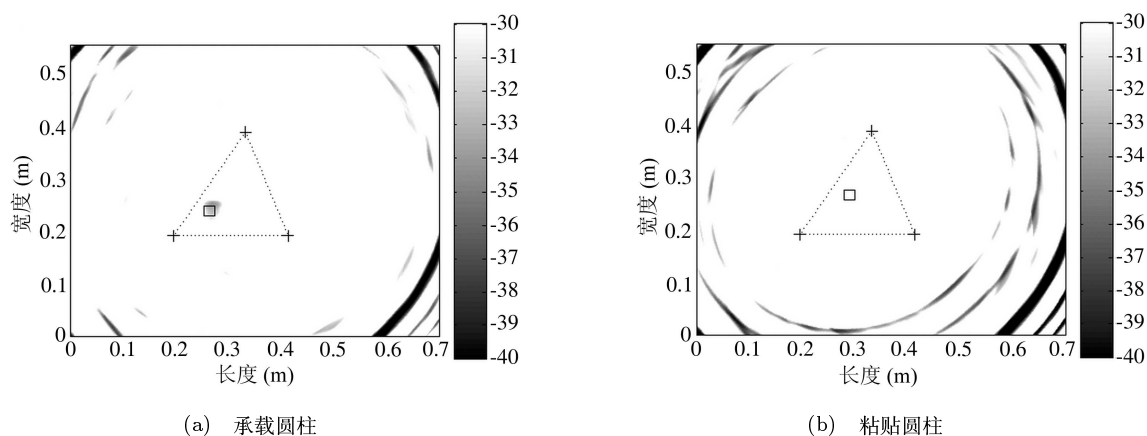


图 10 振动调制超声导波缺陷成像结果

5 结论

利用振动声调制导波技术对板内粘贴和承载圆柱缺陷进行了检测试验研究。由于承载圆柱 - 接触类缺陷的存在, 高频超声导波被低频振动信号所调制, 在超声导波序列的时频分布中产生明显的低频振动分量。利用分离出的低频分量下的高频导波信号进行缺陷成像, 实现了接触缺陷检测。由于粘贴圆柱为线性缺陷, 不会引起超声振动调制, 在其超声导波序列的时频分布中未出现低频振动分量。利用分离出的低频分量下的高频超声导波信号进行缺陷成像, 未能检测出该线性曲线的存在。研究表明, 振动调制超声导波技术作为一种非线性超声检测方法, 对于接触类缺陷检测具有灵敏性。但该检测方法受结构低频振动模态影响大, 且检测系统复杂。

根据振动声调制检测原理, 只有当低频振动能够改变接触缺陷的接触状况条件下, 才能产生振动声调制现象。因此, 振动声调制接触缺陷检测时, 要求接触缺陷界面 (裂痕或承载圆柱体) 与低频振动方向相垂直, 才可能实现该类缺陷的检测。后续有待于

将研究方法对结构中实际接触类缺陷的检测, 如微裂纹, 有待于进一步开展。

参 考 文 献

- 1 Konstantinidis G, Drinkwater B W, Wilcox P D. The temperature stability of guided wave structural health monitoring system. *Smart Mater. Struct.*, 2006; **15**(4): 967—976
- 2 Konstantinidis G, Wilcox P D, Drinkwater B W. An investigation into the temperature stability of a guided wave structural health monitoring system using permanently attached sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2007; **7**(5): 905—912
- 3 Croxford A J, Wilcox P D, Drinkwater B W, Konstantinidis G. Strategies for guided wave structural health monitoring. *Proc. R. Soc. A*, 2007; **463**(2087): 2961—2981
- 4 Michaels J E, Michaels T E. Guided wave signal processing and image fusion for in situ damage localization in plates. *Wave Motion*, 2007; **44**(6): 482—492
- 5 Michaels J E, Michaels T E. Enhanced differential methods for guided wave phased array imaging using spatially distributed piezoelectric transducers. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2006; **25**(820): 837—844
- 6 Lu Y, Michaels J E. A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations. *Ultrasonic*, 2005; **43**(9): 717—731

- 7 Van Den Abeele K, Johnson P A, Sutin A. Nonlinear elastic wave spectroscopy techniques to discern material damage, part I: nonlinear wave modulation spectroscopy. *Res. Nondetr. Eval.*, 2000; **12**(1): 17—30
- 8 Solodov I Y, Krohn N, Buss G. CAN: an example of non-classical acoustic nonlinearity in solids. *Ultrasonics*, 2002; **40**(1-8): 621—625
- 9 邓明晰. 弱界面分层结构中的非线性兰姆波. *声学学报*, 2007; **32**(3): 205—211
- 10 税国双, 汪越盛. 利用直接激发 Rayleigh 表面波的方法测量材料的声学非线性系数. *声学学报*, 2008; **33**(4): 378—384
- 11 邓明晰. 各向异性固体板中的非线性超声导波. *声学学报*, 2008; **33**(3): 252—261
- 12 陈建军, 姜文华, 水永安. 各向同性固体界面非线性反射的实验研究. *声学学报*, 1999; **24**(2): 137—142
- 13 廉国选, 李明轩. 固体滑移界面的超声评价. *声学学报*, 2005; **30**(1): 21—25
- 14 Zaitsev V, Nazarov V, Gusev V, Castagnede B. Novel nonlinear-modulation acoustic technique for crack detection. *NDT&E International*, 2006; **39**(3): 184—194
- 15 Duffour P, Morbidini M, Cawley P. A study of the vibro-acoustic modulation technique for the detection of cracks in metals. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2006; **119**(3): 1463—1475
- 16 Sheppard K, Zagrai A, Donskoy D. A non-linear acoustic, vibration-modulation technique for the detection monitoring of contact-type defects, including those associated with corrosion. *Corrosion Reviews*, 2007; **25**(1-2): 81—96
- 17 Donskoy D, Sutin A, Ekimov A. Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for non-destructive testing. *NDT&E International*, 2001; **34**(4): 231—238
- 18 Donskoy D, Sutin A. Vibro-acoustic modulation nondestructive evaluation technique. *Journal of Intelligent Material System and Structure*, 1998; **9**(9): 766—771
- 19 Kim J Y, Yakovlev V A, Rokhlin S I. Surface acoustic wave modulation on a partially closed fatigue crack. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004; **115**(5): 1961—1971
- 20 Kim J Y, Yakovlev V A, Rokhlin S I. Parametric modulation mechanism of surface acoustic wave on a partially closed crack. *Applied Physics Letters*, 2003; **82**(19): 3203—3205
- 21 Kazakov V V. Sensitive imaging of an elastic nonlinear wave-scattering source in a solid. *Applied Physics Letters*, 2002; **81**(4): 646—648
- 22 Ekimov A E, Didenkulov I N, Kazakov V V. Modulation of torsional waves in a rod with a crack. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999; **106**(3): 1289—1291
- 23 Kazakov V V, Sutin A M. Pulsed sounding of cracks with the use of the modulation of ultrasound by vibrations. *Acoustical Physics*, 2001; **47**(3): 308—312