

用二维傅里叶变换识别兰姆波模式的研究

刘镇清, 他得安

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘要: 本文用二维傅里叶变换信号处理进行了兰姆波模式分析。通过理论计算与实验结果比较表明, 二维傅里叶变换技术能有效地分析识别兰姆波模式。实验中, 采用直探头与可变角探头作为超声波换能器做了接收宽带兰姆波信号的对比。

关键词: 兰姆波; 二维傅里叶变换; 频散曲线

中图分类号: O422.7

文献标识码: A

Mode identify of Lamb wave by means of 2-D FFT

LIU Zhen-qing, TA De-an

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Analysis of Lamb wave mode using 2-D FFT signal processing is done in this paper. The comparison between the theoretical calculations and experimental results show that the 2-D FFT technique can be effectively used to analyze Lamb wave mode. In the experiment, both the normal probe and variable angle probe are used to receive broadband Lamb wave signals.

Key words: Lamb waves; 2-D FFT; dispersion curve

1 引言

兰姆波在本质上是二维的(局限在板中), 其衰减不如三维体波大, 因此其传播距离长, 工程技术人员因此希望应用兰姆波对大型的板状材料进行快速的无损检测^[1]。然而, 普通超声探伤仪激发的兰姆波在传播中通常包含不止一个模式, 而且其频带较宽、频散也相当明显。如果被激励的不同模式兰姆波的群速度在激发频率范围内比较接近, 则将不同模式在时域上分解开需要传播相当长的距离。进行兰姆波速度测量和模式识别的方法有相位展开法、小波变换法以及二维傅里叶变换法; 相位展开法可精确测定兰姆波的相速度, 但不同的模式在时域上要分得开^[2,3], 因而有局限性; 小波变换法一般给出的是兰姆波的群速度^[4], 当不同模式兰姆波频率成分相近时, 一次性测量的小波变换不能对多模式兰姆波信号进行有效分解^[5]。本文介绍的应用二维傅里叶变换法进行兰姆波模式识别的方法性能较好, 有时它也是定量测量兰姆波频散曲线的一种方

法^[6]。它将接收到的幅度-时间记录转换为各个离散频率点的幅度-波数记录, 从而分解出单个兰姆波, 并可对其幅值进行测量。二维傅里叶法最大的优点, 也是无损检测应用中最重要, 就是可同时测量兰姆波的幅值和相速度。

2 原理

测量传播中的兰姆波特性所遇到的主要问题是在任何给定频率可存在不止一个模式。二维傅里叶方法是测量应力波速度的一维相位谱法的扩展。有限尺寸换能器激发的宽带信号通常激发出多个传播模式, 有时不易应用相位谱法测量兰姆波的相速度。因该方法中隐含地假设当前只有一个传播模式。

设多模式的兰姆波信号为 $u(x, t)$, 其中 x 为传播距离、 t 为传播时间, 则对实验信号 $u(x, t)$ 实施空间与时间傅里叶变换可得如下形式的二维傅里叶变换:

$$H(k, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, t) e^{-i(kx - \omega t)} dx dt \quad (1)$$

其中, $\omega = 2\pi f$ 是角频率, 波数 $k = \omega/c$, c 为相速度。

实际计算时采用离散二维傅里叶变换, 离散二维傅里叶变换的定义与一维傅里叶变换相似。这个变换的结果将是在各个离散的频率点和波数点的二维幅值序列。与一维时的情况相类似, 必须在时间上和空间上以较高频率和波数采样, 以避免假频。本文还用窗函数如汉宁窗来降低泄露, 而且在信号

收稿日期: 2000-07-10; 修订日期: 2000-08-22。

国家自然科学基金与国家教委跨世纪优秀人才培养计划基金资助课题, 庆祝上海市声学学会成立 20 周年征文

作者简介: 刘镇清(1962), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事超声波及其应用、现代信号处理与系统的研究。

的尾部加零以使最大幅度的频率和波数可以较好地确定。二维傅里叶算法可以确定以同一频率传播的不同模式的相速度。

3 实验

3.1 实验装置

实验所用到的装置如图 1 所示。实验中,脉冲发生器发出的脉冲同步触发示波器,发射换能器激励的超声波沿板材传播并被接收换能器所接收,接收信号经过放大传到示波器显示,并进行波形数字化采集,波形数字化仪出来的信号通过 GPIB 总线传到计算机进行信号处理(离散二维傅里叶变换)。实验中换能器如图 1 所示放置在检测试样的一侧,实验用的检测试样为单层或多层铝板。用两块铝板中间充水来模拟有缺陷的多层板,中间层的厚度加以控制,以使实验值和理论值可对应。

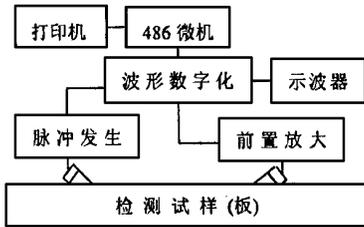
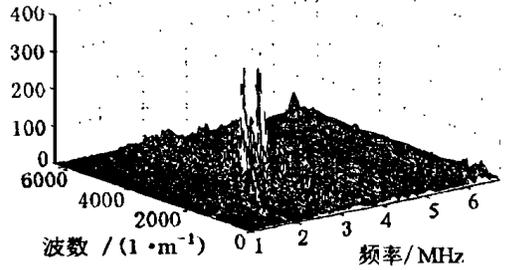


图 1 实验装置

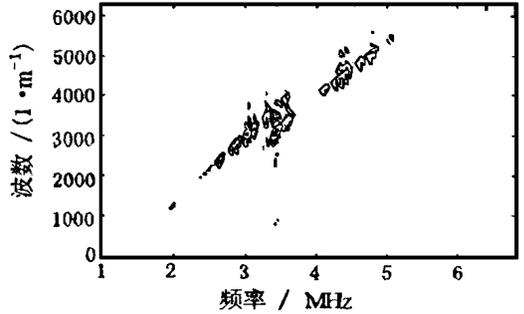
3.2 实验信号二维傅里叶变换结果

图 2(a) 显示的是对 1mm 厚单层铝板检测信号的二维傅里叶变换结果。这里,波形数字化仪的采样频率为 20MHz、采样点数为 2000(下同),可变角发射换能器和接收换能器的发射角及接收角均为 16° 、中心频率均为 5MHz。接收换能器首先在距发射换能器 123mm 处,再使接收换能器以间隔为 1mm 的步长靠近发射换能器,总采样组数为 64 组,这样一来便得到含点时间和空间信息的兰姆波信号 $u(x, t)$ 。图 2(b) 为图 2(a) 的等高线图。从图 2 中可大致判断有多种兰姆波模式存在。从图 2(b) 等高线图上可发现大约两种模式起主要作用,从图 2(a) 的幅值上可看出它们的能量占很大比重。

再对 1mm 厚单层铝板采用斜探头激发兰姆波,用直探头接收所得信号组进行二维傅里叶变换,其结果如图 3(a) 所示。实验中,用中心频率为 5MHz 的宽带可变角换能器激发兰姆波,换能器的发射角为 16° ,接收直探头的中心频率为 5MHz。发射换能器与接收换能器之间的距离从 49mm 到 70mm 以 1mm 步长变化进行空间采样,总采样组数

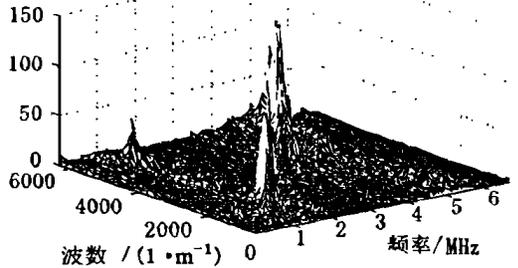


(a) 单层铝板斜探头检测信号二维傅里叶变换的三维图像

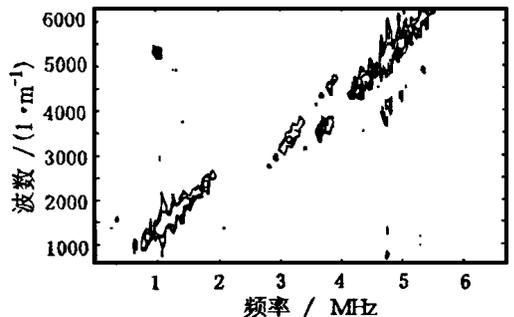


(b) 二维傅里叶变换的等高线图

图 2 单层铝板斜探头检测信号的二维傅里叶变换及其等高线图



(a) 单层铝板直探头检测信号二维傅里叶变换的三维图像



(b) 二维傅里叶变换的等高线图

图 3 单层铝板直探头检测信号的二维傅里叶变换及其等高线图

为32。图3(b)为该二维傅里叶变换的等高线图。从图3中可了解到,这里的信息量更多。

3.3 实验结果与理论计算对比

采用文献[7]的理论,以波数 k 及频率 f 为变量计算得到的频散曲线见图4与图5,这里与文献[7]数值计算中以相速度及频率为变量的做法有所不同。图4为1mm厚单层铝板的频率和波数关系;图5为铝-水-铝三层板波数和频率关系曲线,其中,三层板中各层铝板层厚为1mm、中间水层的厚度为0.12mm。图中 a_0, a_1, a_2, \dots 代表非对称型兰姆波零阶、一阶、二阶等模式, s_0, s_1, s_2, \dots 代表对称型兰姆波零阶、一阶、二阶等模式。

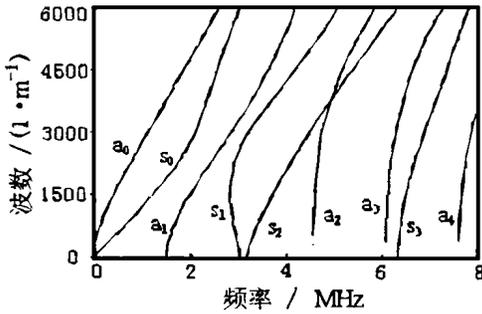


图4 单层铝板中的波数和频率

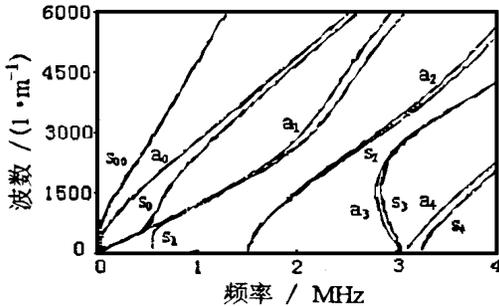


图5 铝-水-铝板中的波数和频率

图6是图2所示的二维傅里叶变换后得到的波数与频率的关系曲线与单层板中兰姆波的频散曲线的理论值对比以后得到的结果,图7是将图3中的二维傅立叶变换的结果与理论的频散曲线对比的结果。在图6中可以发现实验中产生的几种传播模式,如 a_1, s_1 等。在图7中可以发现实验中产生了 s_0, s_1, a_1, a_2 等模式。尽管实验有一定的误差,但还是可以发现实验值与理论值吻合较好。同时也可发现,用直探头接收到的模式更多一些。

图8中的等高线是用斜探头激发、斜探头接收铝-水-铝板中兰姆波信号的二维傅里叶变换结果,

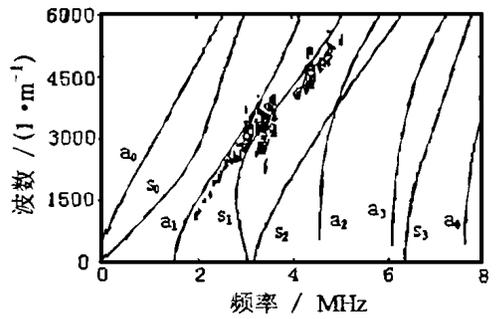


图6 斜探头接收时单层铝板的兰姆波

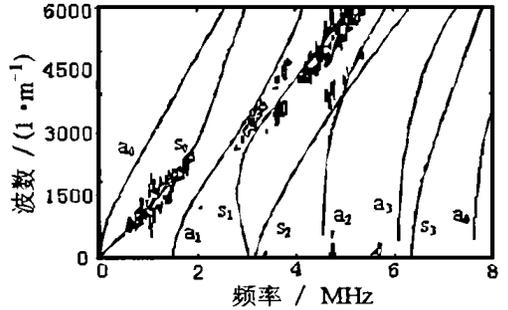


图7 直探头接收时单层铝板的兰姆波

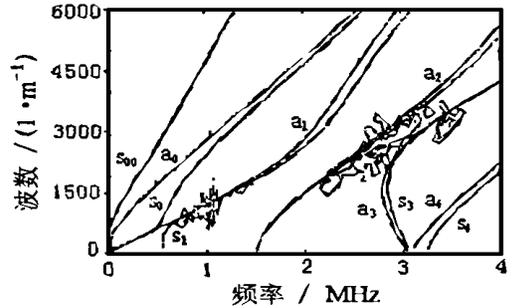


图8 斜探头接收时铝-水-铝板中的兰姆波

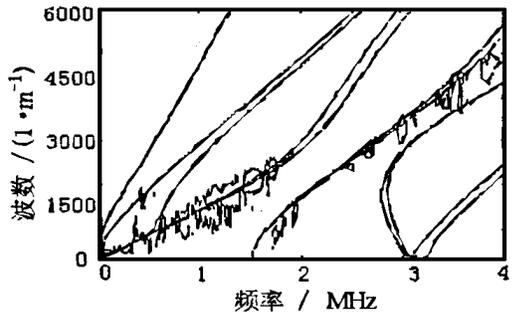


图9 直探头接收时铝-水-铝板中的兰姆波
被测三层板中两侧铝板层厚均为1mm、水层的厚度为0.12mm,其余测试环境与图2一致。图9中的等

(下转第219)

图 3 是测量面上声强的标准格式显示,图 4 是对应的彩图格式显示。

5 隔声量测量实例

被测构件是一侧贴有吸声材料的钢板,安装在固定框架上,可以开启和关闭(图 5)。测量中,扬声器产生宽频带的噪声,利用声强探头分别测量构件两侧的入射声强和透射声强,进而计算出该构件的隔声量,结果见图 6。图 6 中同时还给出了参照 GBJ75—84 规范,用“开关”方法通过声压测量求得的构件插入损失^[2],以作比较。

6 结束语

声强测量具有声压测量所不具备的诸多优点,

包含的信息量也更加丰富。利用 LMS CADA-X 中声强分析软件,结合声强探头等硬件设备,可以方便地进行一系列完整的声强测量、分析和结果显示,特别是在 VXI 总线的测试仪器配合下,软件的灵活性和可靠性得到进一步的提高^[3]。

参考文献:

- [1] LMS International. Acoustic Intensity Analysis Manual [M] (Rev. 3. 5. B), LMS Company, 1999 年 9 月.
- [2] 潘仲麟,张邦俊. 环境声学及噪声控制 [M]. 杭州: 杭州大学出版社, 1997 年 9 月.
- [3] 张令弥. 动态测试技术的发展系列讲座 [J]. 振动与冲击, 1998, 17(1): 89-91.

(上接第 214 页)

高线是用斜探头激发、直探头接收该铝-水-铝板兰姆波信号的二维傅里叶变换结果,其测试环境与图 3 一致。在图 8 中可以发现 s_1 或 a_1 、 a_2 或 s_2 、 a_3 或 s_3 等模式,在图 9 可以发现 a_0 、 s_0 、 s_1 或 a_1 、 a_2 或 s_2 、 a_3 或 s_3 等模式。显然,这里用直探头接收到的模式也更多一些。由于此种结构中兰姆波频散曲线的特殊性,以及二维傅里叶变换的分辨率限制,尚不能在实验上将两个挨得很近的模式更清楚地检测出来。本课题组正在开展有关高分辨率兰姆波模式识别技术的研究,结果将另文发表。

4 结束语

兰姆波的模式识别及相速度检测一直是比较困难的工作,以往的研究通常采用扫频法或扫频法与几何分析相结合的方法来测定兰姆波的相速度,这种方法的实用性比较低。本文采用的二维傅里叶变换法可以对脉冲激励的宽带兰姆波进行相速度检测和模式识别。通过对实验激发产生的兰姆波进行二维傅里叶变换,可在一定程度上分离传播的兰姆波模式。从本文的结果可以看出,用二维傅里叶变换分析板中传播的兰姆波是比较好的一种方法。另外,经典的斜探头激发、斜探头接收可获得较单纯的板中兰姆波信号^[7],本文采用的超声斜探头激发、直

探头接收可获得更丰富的兰姆波模式。

参考文献:

- [1] 刘镇清. 无损检测中的超声兰姆波 [J]. 无损检测, 1999, 21(9): 409-414.
- [2] Z. Q. Liu (刘镇清), R. J. Huang (黄瑞菊). Experimental analysis of acoustic-ultrasonic wave propagation mode in thin plate [J]. Chinese Journal of Acoustics, 2000, 19(3): 277-284.
- [3] 刘镇清. 测量超声波速度的相位谱方法 [J]. 声学技术, 1993, 12(2): 19-22.
- [4] 韩俊波, 程建春. 小波技术分析瞬态 Lamb 波 [C], 98 全国声学学术会议论文集. 成都: 成都科技大学出版社, 1998, 8: 309-310.
- [5] 谢远遐. 层状板材超声 Lamb 波无损检测研究 [D]. 上海: 同济大学声学专业硕士学位论文, 2000 年.
- [6] D. Alleyne and P. Cawley. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 89(3): 1159-1168.
- [7] 刘镇清, 张海燕. 固/液/固三层结构板中超声兰姆波的频散特性 [J]. 声学技术, 2000, 19(4): .