

# 薄板声-超声检测时兰姆波传播模式的有限元模拟

魏运飞, 卢超, 张在东

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

**摘要:** 在声-超声检测中, 正确认识超声波传播特性是其被有效应用的基础。通过有限元数值模拟的方法, 研究薄板中声-超声检测形式下超声波传播模式, 对模拟产生的波形信号用二维傅里叶变换法进行模式识别, 并与兰姆波的理论波数频散曲线进行对比, 证实产生了多模式兰姆波。使用波场快照图观测了声-超声检测方式下超声波的传播特性。研究表明, 将数值模拟方法和试验相结合是研究超声检测技术的有效途径。

**关键词:** 声-超声检测; 兰姆波检测; 二维傅里叶变换; 有限元模拟

中图分类号: TG115.28; O242.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)07-0520-05

## Finite Element Modeling of Acousto-Ultrasonic Lamb Wave Propagation Mode in Thin Plate

WEI Yun-Fei, LU Chao, ZHANG Zai-Dong

(Key Lab of Nondestructive Testing(Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** In the acousto-ultrasonic technique, it is essential for successful application of the technique to understand the propagation characteristics of ultrasonic wave. An FEM method was used to investigate the acousto-ultrasonic wave propagation. The simulating signal was processed by 2-DFFT to recognize the modes and compare with the theoretical parameter curve of the frequency versus wave number spectrum. It had been found that the dominant acousto-ultrasonic wave produced were multimode lamb waves. In order to show the acousto-ultrasonic wave propagation, the results were presented in form of snapshots. It was approved that combine the numerical analysis with experiment was an efficiency way in the ultrasonic testing.

**Keywords:** Acousto-ultrasonic testing; Lamb waves; 2D-FFT; Finite element modeling

声-超声检测技术通常将两个相隔一定距离的换能器放置在试件的同一表面上。换能器以垂直入射方式将超声脉冲调制信号引入试件。这些调制信号受到传播路径上各种因素的影响, 会发生散射、模式转换及衰减, 对信号进行分析后能获得大量的检测信息<sup>[1]</sup>。目前对于声-超声信号的分析主要采用应力波因子(SWF)分析方法, 这种方法基本上是模仿声发射特征定义的, 存在的局限性为: 不能精确地描述试件中损伤状况的几何形状, SWF 参数与试件

的强度之间尚不能建立单值的相互关系, 不能建立基于断裂力学与破坏机制的相互关系<sup>[2]</sup>。声-超声检测技术作为一种超声检测的形式, 研究其超声波传播机理是不可回避的课题<sup>[3-4]</sup>。

关于薄板中声-超声检测传播模式的研究, 刘镇清等人从理论上预计能激发出多模式的兰姆波, 并利用相位展开求相速度的方法, 对两种不同厚度铝板声-超声检测信号进行分析, 识别出了 S0 和 A0 两种模式兰姆波<sup>[5]</sup>。

笔者采用有限元模拟的方法, 对薄板中声-超声激励方式建模, 模拟薄板中声-超声检测形式下波形传播。通过求解兰姆波频率方程, 绘制出 4 mm 薄板中兰姆波的理论波数频散曲线。利用二维傅里叶变换法, 对模拟产生的时域波形信号绘制波数-频率

收稿日期: 2008-10-17

基金项目: 航空科学基金资助项目(2007ZF56013); 无损检测技术教育部重点实验室开放基金资助项目(ZD20070094)

作者简介: 魏运飞(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为超声波检测。

等高线,对比理论波数频散曲线进行模式识别。

## 1 声-超声形式下兰姆波频散曲线理论求解

兰姆波是在激励声波波长与板厚尺寸为相同数量级时,由横波和纵波在固体声波导中合成的特殊形式的应力波<sup>[6]</sup>。板表面自由态边界条件兰姆波频率特征方程为:

对称模式:

$$4pq \tan \frac{\pi fd}{c_p} q + (p^2 - 1)^2 \tan \frac{\pi fd}{c_p} p = 0 \quad (1)$$

反对称模式:

$$(p^2 - 1)^2 \tan \frac{\pi fd}{c_p} q + 4pq \tan \frac{\pi fd}{c_p} p = 0 \quad (2)$$

$$\text{式中 } p = \left[ \left( \frac{c_p}{c_s} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$q = \left[ \left( \frac{c_p}{c_L} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}};$$

$c_p$ ——兰姆波相速度;

$c_L$ ——纵波的传播速度;

$c_L = 6036 \text{ m/s}$ ;

$c_s$ ——横波的传播速度;

$c_s = 3107 \text{ m/s}$ ;

$d$ ——板厚;

$f$ ——兰姆波频率。

群速度  $c_g$  和波数  $k$  与相速度  $c_p$  有如下关系<sup>[7]</sup>:

$$c_g = c_p^2 \left[ c_p - (fd) \frac{dc_p}{df} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$k = \frac{\omega}{c_p} \quad (4)$$

式中  $\omega$ ——角频率;

$\omega = 2\pi f$ 。

求解式(3)和(4),得到群速度和波数频散曲线(图1)。

## 2 二维傅里叶变换原理及兰姆波模式识别

假定谐波在板中传播,则板表面的位移  $u(x, t)$  可用下式描述:

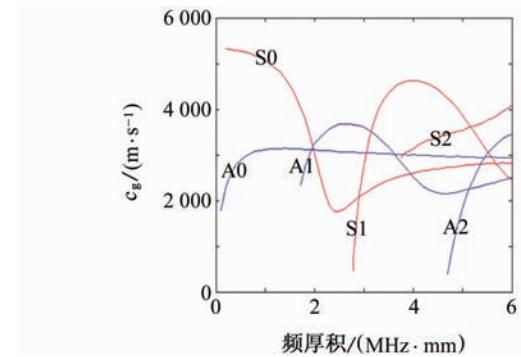
$$u(x, t) = A(\omega) e^{i(\omega t - kx - \theta)} \quad (5)$$

式中  $A(\omega)$ ——依赖频率的幅值常数;

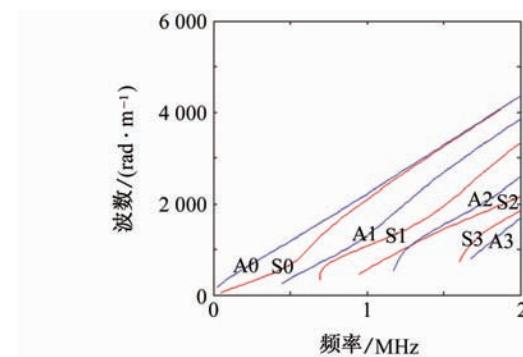
$$k = \omega/c_p;$$

$\theta$ ——相位。

从式(5)可以看出,传播的兰姆波无论在频率域还是空间域都是正弦的。因此,时间的傅里叶变换可以实现从时域到频域的转换,而空间的傅里叶变



(a) 理论群速度频散曲线



(b) 厚 4 mm 薄板中兰姆波波数的频散曲线

图 1 理论群速度和波数频散曲线

换可以实现从频域到波数域的转换,从而可以测量各个模式的幅值和波数。

实际操作时,对所得的数据实施空间傅里叶变换。需要对式(5)实施如下变换<sup>[8]</sup>:

$$H(k, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, t) e^{-i(kx + \omega t)} dx dt \quad (6)$$

二维傅里叶变换的实现过程是对每一个检测位置响应的时间历史信息进行傅里叶变换,得到每一位置的频率谱。在这个阶段,每一位置的谱信息用列矩阵表示,将这些列矩阵组成一个阵列,则给定频率处的元素形成的行向量的空间傅里叶变换给出了幅值-波数-频率信息。实际上,可采用二维快速傅里叶变换算法(2D-FFT)。这种方法可以测定同一频率下不同传播模式的幅值和速度<sup>[9]</sup>。

采用 2D-FFT 进行兰姆波模式识别,通过将接收到的幅度-时间记录变换到各离散频率点的幅度-波数记录,从而可分解出各兰姆波模式并测出它们的幅值,该方法克服了多模式及频散问题<sup>[10-11]</sup>。笔者采用该法对所采集的信号绘制波数-频率等高线,对比图 1 的理论波数频散曲线,从而分析兰姆波的各个模式,并进行模式识别。

### 3 声-超声检测有限元模拟

#### 3.1 模型的建立

用ABAQUS/Explicit瞬态动力分析进行板中超声波传播的数值模拟。模型长500 mm,宽40 mm,厚4 mm。网格类型采用CPE4R单元。材料为钢,其杨氏模量 $E=200$  GPa,泊松比 $\nu=0.32$ ,密度 $\rho=7850$  kg/m<sup>3</sup>,步进时间0.2 μs(采样频率5 MHz)。依照声-超声激发方式,垂直施加瞬时压力模拟入射纵波,据左侧边界一定距离处开始接收信号,并间隔网格单元长度采32组数据。模型如图2所示。

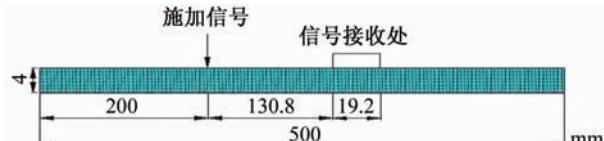


图2 声-超声方式检测模型

#### 3.2 激励信号

采用通过高斯函数调制的正弦信号,其函数为:

$$f(t) = \begin{cases} e^{-(t-\frac{\tau}{2})^2/\sigma^2} \cdot \sin(2\pi ft) & t \leq \tau \\ 0 & t > \tau \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\tau$ 为信号的脉冲时间。脉冲取三个周期。在模拟时,分别采用三种不同频率信号(0.25, 0.6和1.2 MHz)进行激发,其信号频谱如图3。

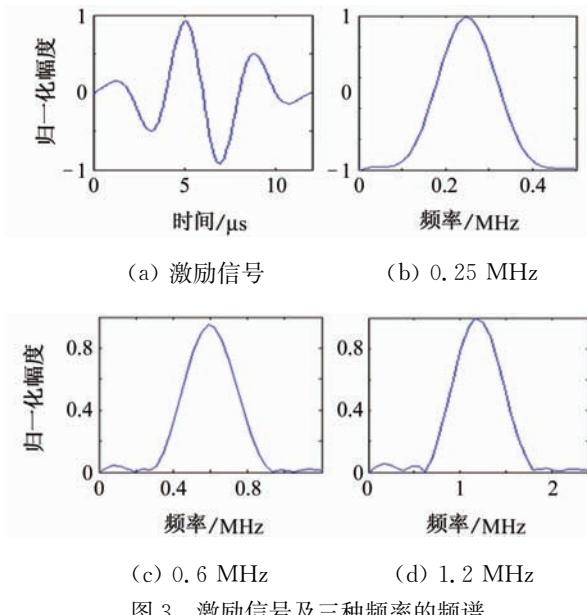


图3 激励信号及三种频率的频谱

##### 3.2.1 激励信号的主频为0.25 MHz

激励信号的主频为0.25 MHz时,频厚积 $fd \approx 1$  MHz·mm。从图1可见,存在S0和A0两种模

式,且此处的群速度 $c_{g_{S0}} = 5069.6$  m/s, $c_{g_{A0}} = 3115.7$  m/s,相速度 $c_{p_{S0}} = 5248$  m/s, $c_{p_{A0}} = 2311.9$  m/s,网格尺寸0.6 mm。在距左侧边界330.8 mm处开始接收信号,在330.8~350 mm处每间隔0.6 mm采一组数据,共采32组数据。在距离激励源150 mm处接收到的信号波形如图4所示。根据上文求解理论群速度计算,S0和A0模式的到达时间分别约为29.5和48.1 μs,与图4所得的波形基本吻合。从图4中能比较明显地分辨出S0和A0模式,但S0模式的幅度远小于A0模式的幅度。

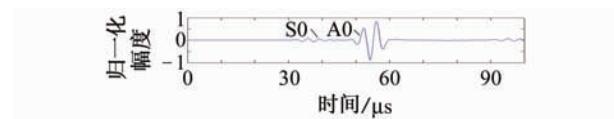
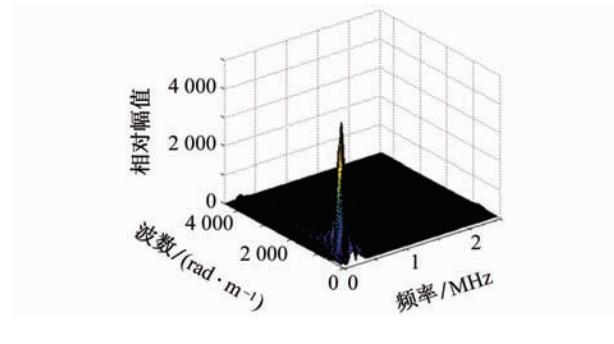
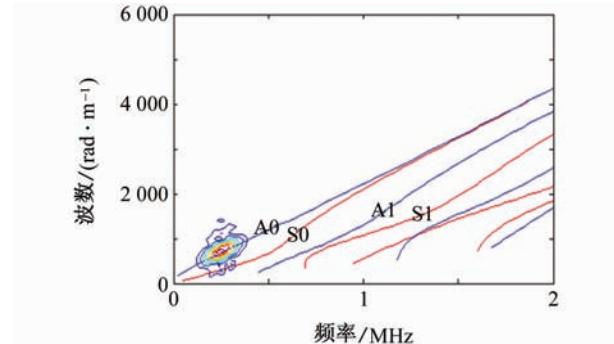


图4 距离激励源150 mm处接收到的信号

采用2D-FFT法进行兰姆波模式识别(图5)。图5(a)为2D-FFT结果的三维图形,其中两个水平方向分别表示频率和波数,竖直方向表示幅值。图5(b)为图5(a)的等高线图与理论计算结果的比较,其中水平方向表示频率,垂直方向表示波数。



(a) 2D-FFT 三维图形



(b) 2D-FFT 等高线图与理论计算结果的比较

图5 0.25 MHz激励下2D-FFT变换结果

观察图5(a)能清楚地辨认一种兰姆波模式,而另一种模式幅度很小。由图5(b)可确定其存在两种模式,即S0和A0,其中A0模式能量较大,S0相

对能量很小,与图 4 吻合。可见,用 0.25 MHz 的信号声-超声方式激发 4 mm 薄板,能产生 S0 和 A0 模式,主要为 A0 模式。这与文献[5]中采用频率 1 MHz 的探头进行声-超声形式激发 0.95 mm 薄板(频厚积约为 1 MHz · mm)所得存在 S0 和 A0 两种模式兰姆波的结论相一致,证明了有限元模拟方法的正确性。

### 3.2.2 激励信号的主频为 0.6 MHz

激励信号主频为 0.6 MHz 时,  $fd \approx 2.4 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 。从图 1 可见,存在 S0, A0 和 A1 三种模式,且此处的群速度  $c_{g_{S0}} = 1758.5 \text{ m/s}$ ,  $c_{g_{A0}} = 3082.8 \text{ m/s}$ ,  $c_{g_{A1}} = 3626.1 \text{ m/s}$ , 网格尺寸 0.25 mm。在距左侧边界 275 mm 处开始接收信号,在 275~283 mm 处每间隔 0.25 mm 采一组数据,共采 32 组数据。在距离激励源 75 mm 处接收的信号波形如图 6 所示。根据上文求解理论群速度计算,A1, A0 和 S0 模式的到达时间分别约为 20.68, 24.33 和 42.65  $\mu\text{s}$ 。从图 6 能辨认出 S0 模式,而 A0 和 A1 群速度相近,很难辨认。

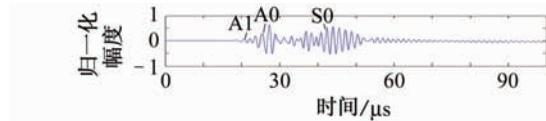
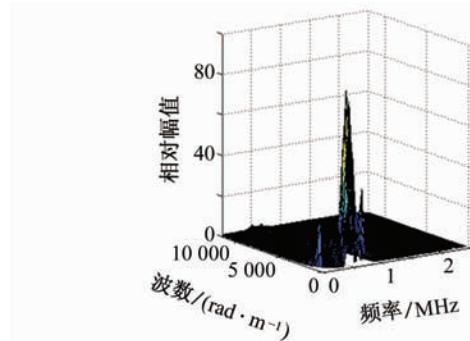


图 6 距离激励源 75 mm 处接收到的信号

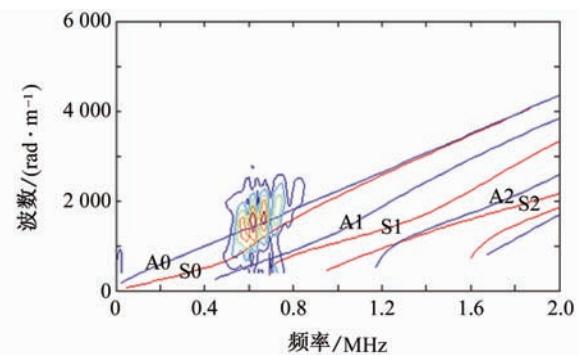
采用 2D-FFT 进行兰姆波模式识别(图 7)。从图 7(a)无法辨认兰姆波模式,而图 7(b)可确定其存在 S0, A0 和 A1 三种模式,还存在能量较小的 S1 模式。这是由于激励信号的频带较宽(甚至能激发 0.8 MHz 的信号),因此此时存在 S1 模式。可见,用 0.6 MHz 的信号声-超声方式激发 4 mm 薄板,能产生 S0, A0 和 A1 模式兰姆波,还存在少量 S1 模式。

### 3.2.3 激励信号的主频为 1.2 MHz

激励信号主频为 1.2 MHz 时  $fd \approx 4.8 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 。从图 1 可见,存在 S0, S1 和 S2 以及 A0, A1 和 A2 六种模式,且此处的群速度  $c_{g_{S0}} = 2733.5 \text{ m/s}$ ,  $c_{g_{S1}} = 4129.3 \text{ m/s}$ ,  $c_{g_{S2}} = 3488.8 \text{ m/s}$ ,  $c_{g_{A0}} = 2964.5 \text{ m/s}$ ,  $c_{g_{A1}} = 2163.1 \text{ m/s}$ ,  $c_{g_{A2}} = 1031 \text{ m/s}$ , 网格尺寸 0.1 mm。距左侧边界 275 mm 处开始接收信号,在 275~278.2 mm 处每间隔 0.1 mm 采一组数据,共采 32 组数据。在距离激励源 75 mm 处接收的信号波形如图 8 所示。根据上文求解理论群速度计算,S1, S2, A0, S0, A1 和 A2 模式的到达时间分别约为 18.16, 21.50, 25.30, 27.44, 34.67 和 72.75  $\mu\text{s}$ 。从图 8 观测波形可见,



(a) 2D-FFT 三维图形



(b) 2D-FFT 等高线图与理论计算结果的比较

图 7 0.6 MHz 激励下 2D-FFT 变换结果

A0, S0 和 A1 幅度较大,S2 较小,S1 和 A2 几乎不能辨认。

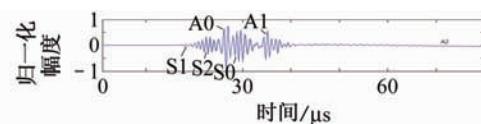


图 8 距离激励源 75 mm 处接收到的信号

采用 2D-FFT 进行兰姆波模式识别(图 9),从图 9(a)可见,不易辨认模式。由图 9(b)可确定其存在 S0, S1, S2, A0, A1 和 A2 多种模式。但能量集中在 S0, A0 和 A1 模式,S1, S2 和 A2 能量较低,与波形图基本吻合。可见,用 1.2 MHz 的信号声-超声方式激发 4 mm 薄板,能产生 S0, S1, S2, A0, A1 和 A2 模式兰姆波。

### 3.3 波场快照图

为更直观地观察薄板声-超声形式下兰姆波模式的传播,笔者给出当采用 0.6 MHz 频率激发 4 mm 薄板时,试样中不同时刻波场快照图(应力分布图)(图 10)。随着时间的增加,薄板中的超声波从左端到右端传播,最右侧波速较快,为 A1 模式,其能量比较低,中间为 A0, 左侧为 S0 模式。

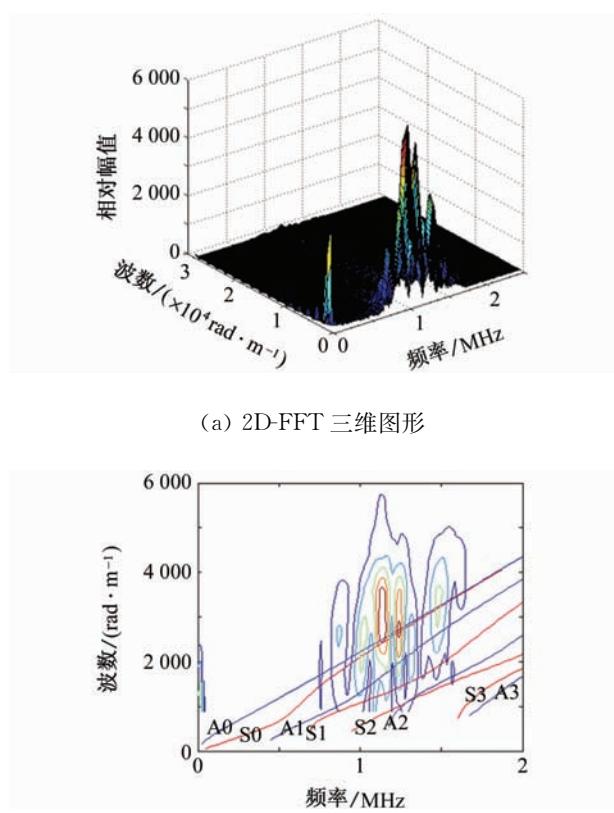


图 9 1.2 MHz 激励时 2D-FFT 变换结果

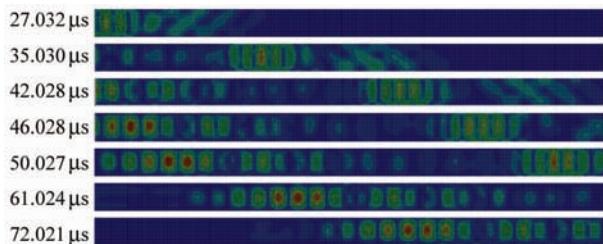


图 10 频率 0.6 MHz 激发 4 mm 薄板时不同时刻的波场快照图

#### 4 结论

运用有限元模拟的方法,研究了薄板中的超声传播模式。采用 0.25, 0.6 和 1.2 MHz 三种频率(频厚积分别为 1, 2.4 和 4.8 MHz · mm)进行声-超声激发模拟,得到以下结论:

(1) 证实了声-超声检测形式下薄板能激发出多模式兰姆波信号。对不同激发频率产生的时域波形进行信号分析,证实其服从兰姆波频散曲线。随着频厚积的增加,逐渐产生了 S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> 和 A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> 等模式。通过波场快照图,可观测声-超声检测方式下薄板中超声波的传播特性。

(2) 通过求解兰姆波频率方程,绘制了兰姆波的理论波数频散曲线。将利用二维傅里叶变换法所得时域信号的波数频散曲线与之对比,进行了模式识别。该方法具有简单、直观的优势。

(3) 从有限元模拟的时频波形曲线上观测,波形理论到达时间与模拟到达时间能够较好地吻合。与文献[5]的对比分析表明,有限元模拟具有一定的精度。兰姆波的产生和传播在实际的边界条件下是个复杂过程,有限元分析方法提供了一种途径,它在模型制作、参数选取与变动、模式的选择方面较之实物模型试验具有灵活性和优越性,能为检测方法的研究和实物试验提供参考依据。

在应用声-超声技术检测薄板时,可基于兰姆波的理论,从频率特性和多模式等特点的角度分析损伤,提取经损伤调制后信号的模式转换、幅度改变等信息,从而更方便、合理地解释声-超声检测过程中的各种物理现象。对定量评估薄板的腐蚀和裂缝以及复合板分层和脱粘等缺陷都有着实际的意义。

#### 参考文献:

- [1] 王勇. 声-超声材料检测技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2000: 6-19.
- [2] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002, 1: 276-292.
- [3] 他得安, 黄瑞菊, 刘镇清. 数值分析法在超声检测中的应用[J]. 无损检测, 2001, 23(11): 485-488.
- [4] 陈建忠, 史耀武. 超声检测过程的数值模拟[J]. 无损检测, 2001, 23(5): 198-201.
- [5] 刘镇清, 黄瑞菊. 薄板声-超声检测超声传播模式的实验研究[J]. 声学学报, 2000, 25(3): 268-273.
- [6] 张海燕, 他得安, 刘镇清. 层状各向异性复合板中的兰姆波[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 126-136.
- [7] Rose J L. 固体中的超声波[M]. 何纯富, 吴斌, 王秀彦译. 北京: 科学出版社, 2004: 91-95.
- [8] Alleyne D, Cawley P. A two-dimensional fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals[J]. J Acoust Soc Am, 1991, 89(3): 1159-1168.
- [9] Heller K, Jacobs L J, Qu J. Characterization of adhesive bond properties using Lamb waves[J]. NDT&E International, 2000, 33(8): 555-563.
- [10] 张海燕, 吕东辉, 刘镇清. 二维傅里叶变换在 Lamb 波模式识别研究中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2004, 24(1): 25-28.
- [11] 刘镇清, 他得安. 用二维傅里叶变换识别 Lamb 波模式的研究[J]. 声学技术, 2000, 19(4): 212-214.