

金属薄板缺陷的超声多途 Lamb 波检测

郭杜斌, 沈希忠, 王磊

(上海应用技术学院 电气与工程学院, 上海 201418)

摘要: 金属薄板在动车等现代化设计中应用广泛, 其是否存在缺陷等检测具有很重要的意义; 为此, 利用超声多途提供的额外数据来检测金属薄板的缺陷, 提出相应的算法, 多途路径在直接反射的路径上是可以预测和识别的, 直接反射路径是相对比较容易识别的; 同时利用 ANSYS 有限元建模不同的薄板缺陷模型, 在不同的传感器位置、缺陷位置、缺陷大小情况下分别进行仿真; 通过 ANSYS 仿真和实验检测都得出了良好的结果, 误差在可控制范围之内, 证明了超声多途应用与金属薄板 Lamb 波检测的是可行的; 仿真和实验表明超声多途通过实际和多途虚拟扩展的传感器数据的分析证明了超声多途能够对薄板缺陷进行定位并检测其大小; 提出的超声多途检测方法, 通过单次测量即可检测出薄板缺陷的位置和大小, 具有良好的检测性能。

关键词: 超声波; 薄板; 多途; ANSYS 有限元仿真; 缺陷; 尺寸

Ultrasonic Multipath Lamb Wave Detection of Sheet Metal Defects

Guo Dubin, Shen Xizhong, Wang Lei

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: Sheet metal in the moving car is widely used in modern design, such as detection of defects has very important significance. For this purpose, the use of ultrasound of multiplicity provide additional data to detect the defects of sheet metal, and the algorithm of multiplicity is predictable path in the direct reflection of the path and identify, directly reflect the path is relatively easy to identify. Using ANSYS finite element modeling different sheet defect model at the same time, the different sensor location, defect location, defect size cases are simulated respectively. Obtained by ANSYS simulation and experimental tests are good results, the error in the range of controlled, proved that the ultrasonic application of multiplicity and sheet metal Lamb wave detection is feasible; Simulation and experiments show that ultrasonic way through actual and virtual extension of multiplicity of sensor data analysis proved that the ultrasonic multiplicity can for detecting sheet to locate defects and their size. Ultrasound of multiplicity of detection method is put forward, through a single measurement can detect the defect size and location of the plate, has good detection performance.

Keywords: ultrasound; sheet; multipath; ANSYS finite element simulation; flaw; size

0 引言

材料缺陷尺寸的检测在超声无损评价 (NDE) 中是个很重要的问题^[1-2]。如果在铝合金配件表面或内部存在有缺陷 (尤其是裂纹, 容易在应力作用下导致缺陷进一步增大), 在外界载荷作用下材料上分布的集中应力将会促使板中缺陷迅速扩大, 进而影响铝合金材料的使用寿命, 给社会经济工作带来安全隐患。超声波检测具有对人体无辐射、操作简单、检测效率高优点, 在铝合金材料的缺陷检测中, 由于铝合金材料属于小颗粒晶体, 超声波在传播过程中的能量衰减减小, 对于较厚的铝合金试件超声波也能进行有效的检测, 超声波的上述特性, 有利于对检测结果的分析, 从而促进了超声波在铝合金材料探伤领域的推广应用。检测缺陷尺寸的一种直接方法是从不同的两个侧面进行 B 型扫描成像^[3]。在金属薄板的探伤中, Lamb 波因其自身在薄板检测中的优势而被广泛应用, 特别是在薄板表面的缺陷探伤^[4-6]。

国外对于 Lamb 波应用于板结构的检测由来已久, 美国的

F. A. Firestone 等人于 20 世纪 50 年代首次将 Lamb 波用于薄板材料结构的探伤检测, R. J. Dewhurst^[5] 等利用激光发射 Lamb 波来对金属薄板的厚度进行检测, D. A. Hutchins^[6] 采用激光产生的 Lamb 波对铝板和金属玻璃材料板进行检测, 并研究了 Lamb 波在铝和金属玻璃材料板中传播波形的频散特性。J. R. Rose^[7] 一直在从事研究导波的特性, 进行了大量的实验验证, 并取得了丰硕的研究成果。随着超声检测技术的不断发展, 各界学者对于 Lamb 的研究也越来越多, 并开始引入一些先进的算法对裂纹进行识别, W. Ostachowicz 与 P. Kudela^[8] 利用 Lamb 在铝合金薄板的传播特性, 提出了一种金属薄板缺陷定位的算法, 仿真和试验结果表明该算法能够较好地缺陷定位。近几年, 基于时间反转的超声导波^[9] 以及超声多途^[10] 检测也成为了 Lamb 波检测的研究热点。国内的一些研究单位和大学对 Lamb 波检测展开了积极的研究工作。例如南京航空航天大学^[11] 在智能材料和结构航空科技重点实验室开展了对材料结构健康监控技术的研究, 并取得了一定的成效; 北京工业大学^[12-13] 利用导波在管道、板结构检测方面开展了大量工作; 上海交通大学^[14]、同济大学声学研究所^[15]、中国科学院声学所^[16] 等也都对板结构的 Lamb 波检测进行了大量的理论研究和实验验证。

本文提出了一种排成一行的传感器阵列的超声收发测量装置来检测一个孤立缺陷, 不同的是^[7], 我们对多途路径进行了分析并结合了不同的路径, 利用 ANSYS 有限元仿真对

收稿日期: 2015-07-13; 修回日期: 2015-09-16。

基金项目: 上海市科委项目 (15ZR1440700)。

作者简介: 郭杜斌 (1990-), 男, 浙江人, 硕士研究生, 主要从事超声检测方向的研究。

通讯作者: 沈希忠 (1968-), 男, 上海人, 主要从事信号处理、超声检测方向的研究。

不同模型进行仿真计算, 通过实际和多途虚拟扩展的传感器数据的分析证明了超声多途能够对薄板缺陷进行定位并检测其大小, 最终用实验对其进行了验证。

1 超声多途

超声多途在文献[3]中有过较为详细的应用, 该文作者主要将其应用于铝合金块的缺陷检测, 并成功对缺陷进行定位并检测出其大小。本文主要利用超声多途作金属铝合金薄板的 Lamb 波检测。

如图 1 为一个超声多途 DRP, 其超声信号 $r(t)$ 建模为

$$r(t) = \sum_i \alpha_i s(t - \tau_i) \quad (1)$$

式中, $s(t)$ 表示超声波回波脉冲波, α_i 和 τ_i 分别表示第 i 次路径的反射率和延迟时间。

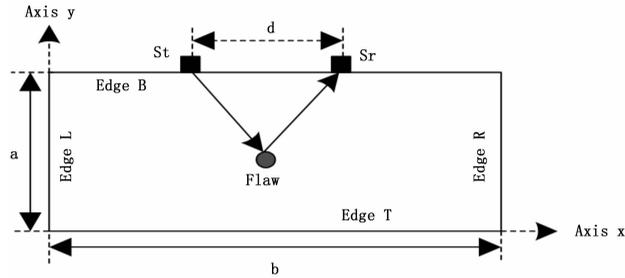


图 1 标准的超声检测系统中的直接反射 (DRP) 场景

图 2 表示多途 MP-W 路径的多途场景。MP-W 是指 Lamb 波在薄板中传播多途路径中检测缺陷底部的路径, 它的传播路径类似英文字母 'W'。

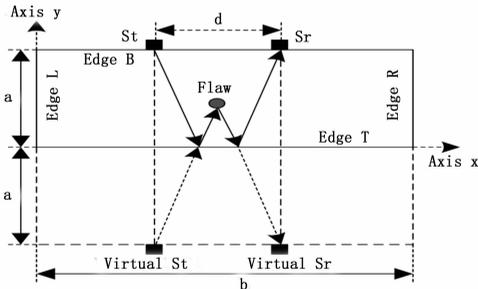


图 2 多途 MP-W 的底部反射场景

假设缺陷的形状为类圆形的凸面体, 其中心点的坐标为 $f_p(x_{f,p}, y_{f,p}, z_{f,p})$, 第 m 个发射传感器位于 $S_{t,m}(x_{t,m}, y_{t,m}, z_{t,m})$, 第 n 个接收传感器位于 $S_{r,n}(x_{r,n}, y_{r,n}, z_{r,n})$ 。与 DRP (直达反射路径) 相对应的第 n 个接收传感器的信号表示为:

$$r_{0,nn}(t) = \alpha_{0,nn}(f_t) s(t - \tau_{0,nn}(f_t)) \quad (2)$$

式中, $\alpha_{0,nn}(f_t)$ 表示缺陷的 DRP (直接反射路径) 反射率, $\tau_{0,nn}(f_t)$ 表示信号经过传播一周后的延长时间。

假设一块均匀介质的材料中具有恒定的超声传播速度 v_g , 与缺陷定点 f_t 相对应的延迟时间可以由如下的计算得到

$$\tau_{0,nn}(f_t) = (S_{t,m} - f_t + S_{r,n} - f_{r,n}) / v_g \quad (3)$$

在式 (3) 中, 表示的是数学中的欧几里得范数运算。

a 表示薄板的宽, b 表示薄板的长, 以薄板的正表面左下角端点为原点建立坐标系, $S_{t,m} = (x_{t,m}, y_{t,m} - 2a, z_{t,m})$, $S_{r,n} = (x_{r,n}, y_{r,n} - 2a, z_{r,n})$ 表示在 MP-W 检测路径中虚拟传感器的

坐标, 详细见于图 2 中。MP-W 检测路径相对应的延迟时间可由如下计算表示

$$MP-W: \tau_{w,nn}(f_b) = (S_{t,w,m} - f_b + S_{r,w,n} - f_b) / v_g \quad (4)$$

上式中, $f_t = (x_{f,t}, y_{f,t}, z_{f,t})$ 与 $f_b = (x_{f,b}, y_{f,b}, z_{f,b})$ 分别表示缺陷的顶点坐标与底点坐标。

当缺陷回波与底面强烈的反射波距离足够远到可以分离开来^[8], 利用传统的技术 (例如, 缺陷检测方法) 就能够很容易地识别出 DRP (直达反射路径) 的缺陷回波。

2 ANSYS 有限元仿真

有限元薄板检测模型如图 3 所示, 我们选用被测 6061 型号铝板的尺寸为 $500 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。

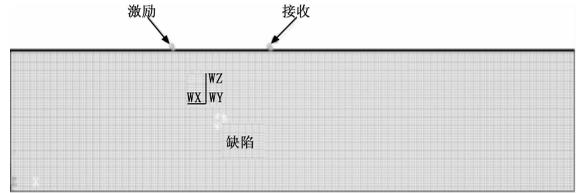


图 3 ANSYS 有限元仿真模型

6061 铝板的弹性模量为 68.9 GPa , 泊松比 0.330 , 密度 $2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 在仿真中我们采用节点激励模拟传感器发射 A0 模态的 Lamb 波, 即从薄板的上边界激励。我们用 Lamb 波的 A0 模态作为激励模态, 仿真中的激励信号^[9-10]为

$$s(t) = \frac{A}{2} \left[H(t) - H\left(t - \frac{n}{f_c}\right) \right] \left(1 - \cos \frac{2\pi f_c t}{n} \right) \sin \frac{2\pi f_c t}{n} \quad (5)$$

即利用窄带激励激发 Lamb 波信号, 用单一频率正弦信号加窗函数 (Hanning 窗) 作为激励信号, 如图 4 所示。

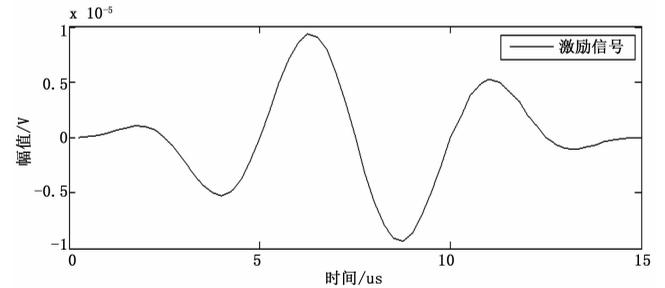


图 4 激励信号

A 表示信号的幅值 $A = 10 \mu\text{V}$; f_c 表示信号的中心频率 $f_c = 200 \text{ kHz}$; n 表示信号的周期数 $n = 3$; $H(t)$ 为 Heaviside 函数, 其表示当 $t > 0$ 时 $H(t) = 1$, $t < 0$ 时 $H(t) = 0$, $t = 0$ 时 $H(t) = 0.5$; 我们对 ANSYS 铝板模型进行 2 mm 的网格划, 分割模型单元选择壳单元, ANSYS 的波形采样频率为 4 MHz 。

2.1 相同传感器位置, 相同缺陷位置不同缺陷大小

传感器的激励节点位于 $(156, 100)$, 接收接收节点位于 $(216, 100)$, 缺陷的为中心位于 $(186, 50)$ 的圆孔缺陷模型。

当缺陷的直径为 4 mm 时, 在点 $(216, 100)$ 观察到的基准模型与缺陷模型的回波如图 5 所示。

图 5 中, 虚线代表 4 mm 圆孔缺陷模型下的 $(216, 100)$ 节点观察回波, 实线代表基准模型下 $(216, 100)$ 节点的观察

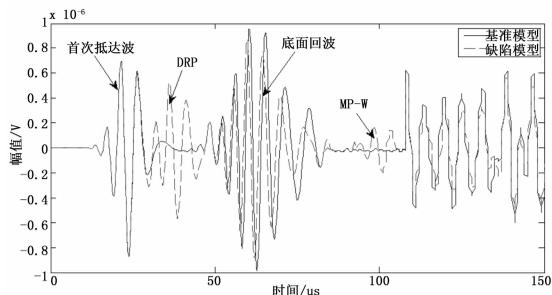


图 5 坐标 (216, 100) 节点接收的基准模型与直径 4 mm 圆孔缺陷模型的回波

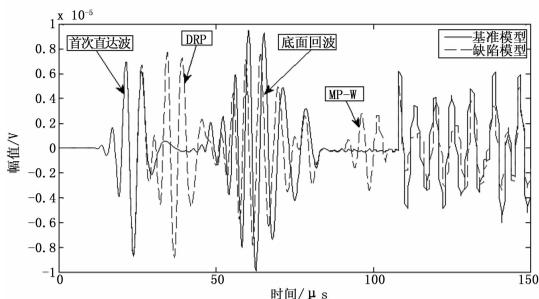


图 7 坐标 (216, 100) 节点接收的基准模型与直径 8 mm 圆孔缺陷模型的回波

回波。由图中我们可以看到，在有缺陷模型的情况下首次直达波在相同接收点的波形完全重合。并且我们可以明显看出在 4 mm 圆孔缺陷模型中的 DRP (直达反射回波) 与 MP-W 回波。由于在仿真中存在着误差，且在有缺陷模型中由于缺陷衍射的原因，形成与底面回波的干涉，以致形成波形模式的转换导致在缺陷模型下底面回波到达观察点的时间与基准模型下的底面回波形成相位差。图 6 表示从仿真模型中提取的缺陷回波并进行 Hilbert 变换。

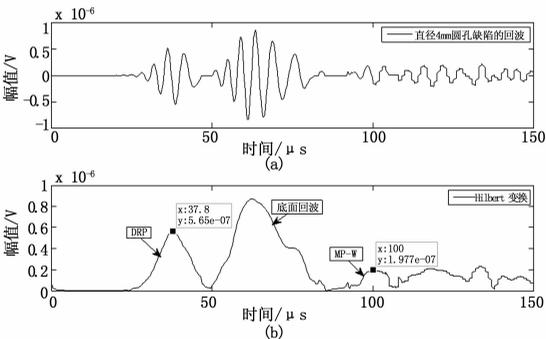


图 6 直径 4 mm 圆孔缺陷提取回波与 Hilbert 变换

从图 6 (b) 中我们可以看到提取的缺陷回波经过 Hilbert 变换之后的波形，DRP 与 MP-W 各自缺陷回波信号的延迟时间分别为 37.8 μs 与 100 μs 。在 ANSYS 建模仿真中，我们通过在网格节点 (216, 100) 测得的首次直达波的时间为 19.33 μs ，从而可以得到 Lamb 波在 6061 铝合金薄板中传播的速度^[11-12]为 $v_L = 2987.29 \text{ m/s}$ 。我们将测得的 DRP 与 MP-W 的延迟时间分别代入公式 (3) 与公式 (4)，可以解得缺陷的顶点坐标与底点坐标分别为 (186, 52.17) 和 (186, 46.32)。由此我们可以得到缺陷的大小为 5.85 mm。

同上所述，对直径 8 mm 圆孔缺陷模型与 12 mm 圆孔缺陷模型进行了 ANSYS 仿真计算，在同样的激励点 (156, 100) 进行了仿真，并在相同地 (216, 100) 节点进行回波观察，我们得到一下波形，如图 7 至图 8 所示。

由图 8 中我们可以分别看出直径 8 mm 圆孔缺陷模型的 DRP 与 MP-W 的延迟时间分别为 37 μs 与 99.3 μs ，图 10 中直径 12 mm 圆孔缺陷模型的 DRP 与 MP-W 的延迟时间分别为 35.8 μs 与 98.5 μs 。将两个模型的延迟时间分为带入公式 (3) 与公式 (4)，我们可以得到 8 mm 直径圆孔缺陷模型的顶点坐标为 (186, 53.59)，底点坐标为 (186, 45.25)；12 mm 直径圆孔缺陷模型的顶点坐标为 (186, 55.74)，底点坐标为

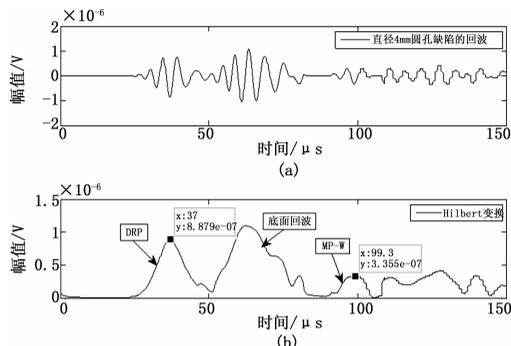


图 8 直径 8 mm 圆孔缺陷提取回波与 Hilbert 变换

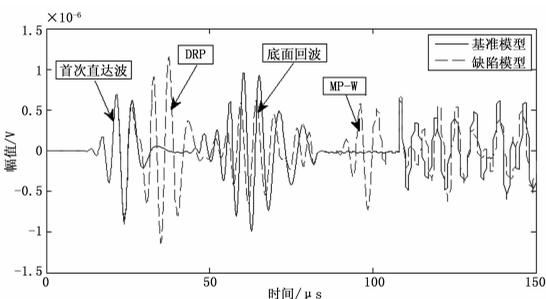


图 9 坐标 (216, 100) 节点接收的基准模型与直径 12 mm 圆孔缺陷模型的回波

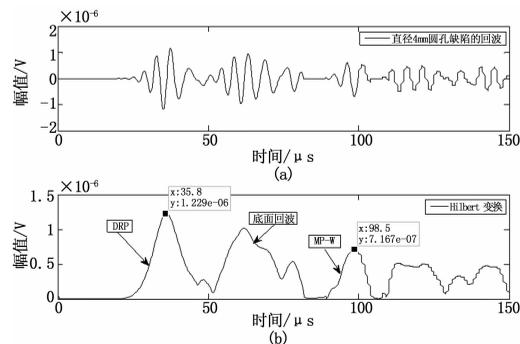


图 10 直径 12 mm 圆孔缺陷提取回波与 Hilbert 变换

(186, 44.03)。

由此，我们可以得到直径为 8 mm 圆孔缺陷模型与 12 mm 圆孔缺陷模型经过 ANSYS 仿真所测得的缺陷的大小分别为 8.34 mm 和 11.71 mm。表 1 表示不同直径缺陷模型所测圆孔大小的相对误差。

表 1 不同圆孔缺陷模型之间的比较

实际尺寸/mm	4	8	12
仿真计算/mm	5.85	8.34	11.71
相对误差/(%)	46.25	4.25	2.42

通过表 1 我们可以知道当缺陷从 4 mm 增大到 12 mm 的过程中, 通过多途反射所测得的缺陷的相对误差逐渐减小, 且由图 6 (b)、8 (b) 与 10 (b) 中可知, 当圆孔缺陷直径逐渐增大时, DRP 与 MP-W 的缺陷反射回波幅值越来越大, 出现时期愈加明显。因此我们可以得出这样的结论, 在模型不变的情况下, 圆孔缺陷越大多途检测效果越好, 缺陷尺寸愈加精确相近。从上述仿真测得的结果可知, 在相同节点中观察到不同模型 DRP 与 MP-W 传播路径的缺陷回波, DPR 是用来检测缺陷的顶点位置, MP-W 是用来检测缺陷的地点坐标, 通过对观察到的缺陷回波进行 Hilbert 变换可以直接读取不同路径缺陷回波的延迟时间, 通过 DRP 与 MP-W 路径的延迟时间可以较为精确的计算出缺陷的大小, 缺陷越大, 结果越精确。所以超声多途检测方法只需通过单次测量就可以对缺陷进行定位并测出其大小。仿真结果最后所造成的缺陷的误差主要是由于 ANSYS 建模在圆孔缺陷以及传感器附近网格划分不均, 以及当缺陷越小时, 经过缺陷的衍射波会对底面波形成更加严重的干涉所造成的。

2.2 相同缺陷位置及大小, 不同传感器位置

当缺陷的尺寸不变, 发射传感器与接收传感器沿着一 y 轴方向每次按步长 10 mm 进行移动, 对每次移动后的模型进行检测, 由于薄板的宽度不变为 100 mm, 所以总共移动 10 次, 假设移动一次, 则发射与接收传感器的编号变为 St_1 与 Rt_1 , 则若移动 m 次, 则变为 St_m 与 Rt_m , 如图 11 所示。

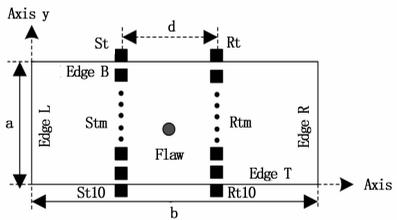


图 11 同种缺陷不同收发传感器位置的模型

对应的图 11, 假设圆孔缺陷的直径为 8 mm, 中心坐标为 (186, 50), 在其他条件不变的情况下即与 2.1 的仿真条件类似。每种情形下收发传感器 St_1 、 Rt_1 至 St_{10} 、 Rt_{10} 对应的坐标分别为:

$$\begin{cases} St_1 : (156, 90) \\ Rt_1 : (216, 90) \end{cases}, \begin{cases} St_2 : (156, 80) \\ Rt_2 : (216, 80) \end{cases}, \dots, \begin{cases} St_{10} : (156, 0) \\ Rt_{10} : (216, 0) \end{cases}。$$

收发传感器 St_1 、 Rt_1 至 St_{10} 、 Rt_{10} 每种情况下的仿真结果如图 12~图 21 所示。

图 12 (a)、(b) 与 (c) 分别表示基准模型与缺陷模型的回波信号与在网格观察节点 (216, 90) 提取出的缺陷回波以及缺陷回波的 Hilbert 变换。从图 12 (a) 中可以看出, 直接反射回波 DRP 的延时时间还是非常容易判断的, 但是检测缺陷底部的 MP-W 的反射回波却被掩盖了, 不能较为明显的观察出其时间, 主要是由于当收发传感器的向 -y 方向移动 1 次后, 上下边界的反射回波对 MP-W 的判断出现了干扰出现

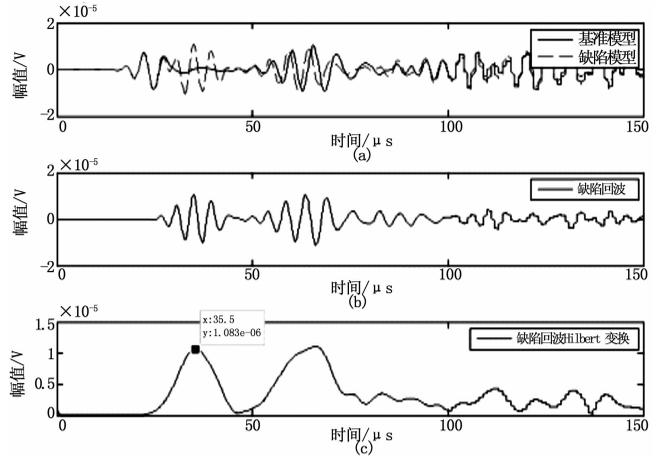


图 12 收发传感器位置分别在 (156, 90) 与 (216, 90) 时的仿真结果

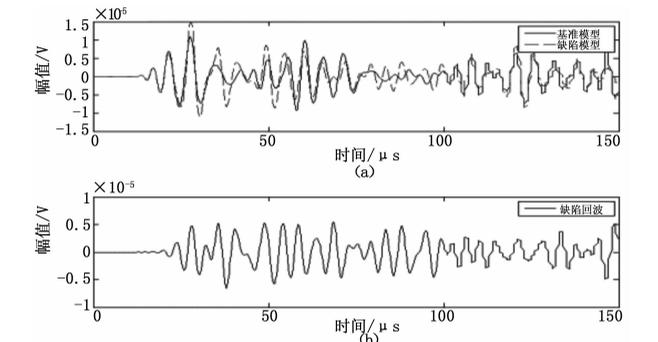


图 13 收发传感器位置分别在 (156, 80) 与 (216, 80) 时的仿真结果

了重叠现象, 以及 Lamb 波在传播过程中存在不同路径波相互之间的干涉所造成的。

从图 13 (a) 中难以判断出直接反射回波 DRP 出现的时间, 主要是由于当收发传感器的向 -y 方向移动 2 次后, 边界 B 的回波会与 DRP 路径的回波造成重叠, 且到达时间差不多一致, 所以较难判断; MP-W 路径的回波已基本被其他回波所掩盖, 更加难以识别。

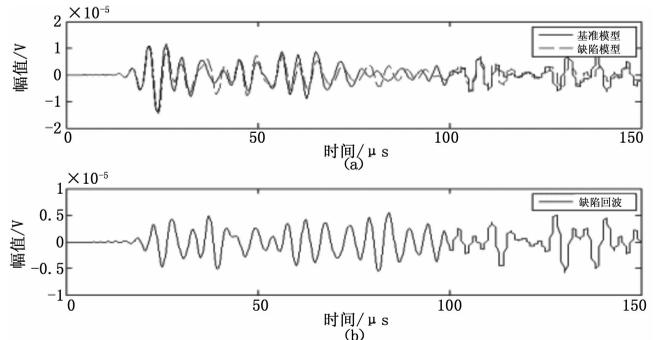


图 14 收发传感器位置分别在 (156, 70) 与 (216, 70) 时的仿真结果

从图 12~图 21 可以看出, 图 12 与图 20、图 13 与图 19、图 14 与图 18、图 15 与图 17 这四组仿真结果图两两相对都是一样的, 这是因为当收发传感器的向 -y 方向逐渐移动, 他

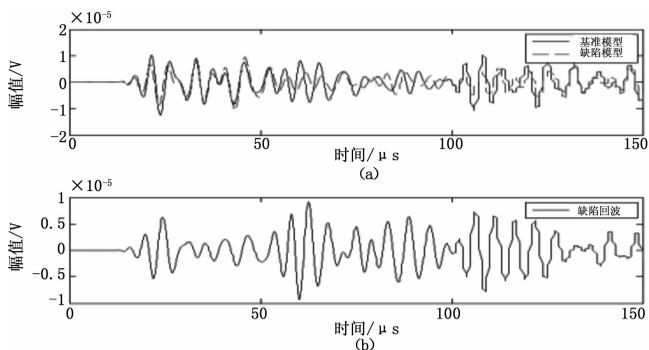


图 15 收发传感器位置分别在 (156, 60) 与 (216, 60) 时的仿真结果

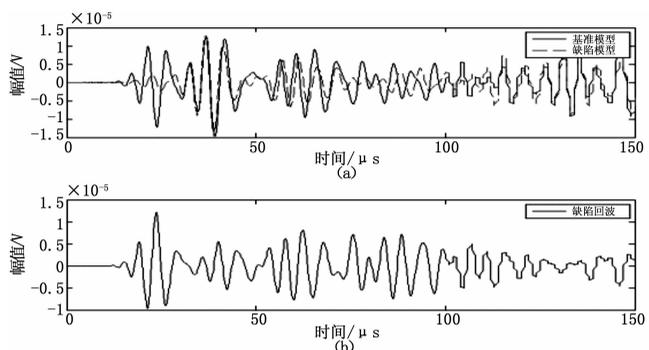


图 16 收发传感器位置分别在 (156, 50) 与 (216, 50) 时的仿真结果

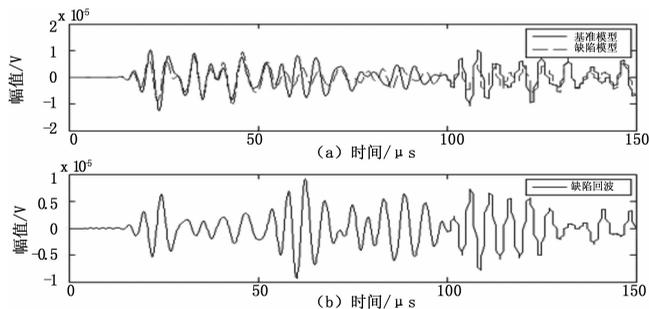


图 17 收发传感器位置分别在 (156, 40) 与 (216, 40) 时的仿真结果

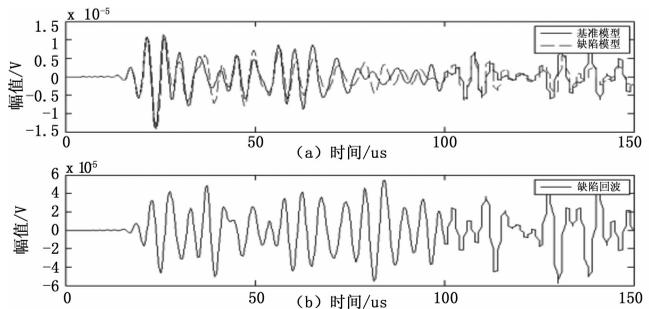


图 18 收发传感器位置分别在 (156, 30) 与 (216, 30) 时的仿真结果

们的位置关系会关于 $y = 50$ 对称; 图 16 中收发传感器的位置正好位于 $y = 50$ 这条直线上, 且由于缺陷的中心位置也在这条线上, 所以接收不到直接反射路径 DRP 的回波, 由于位于

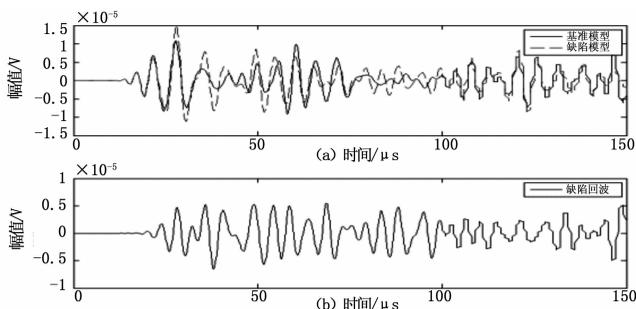


图 19 收发传感器位置分别在 (156, 20) 与 (216, 20) 时的仿真结果

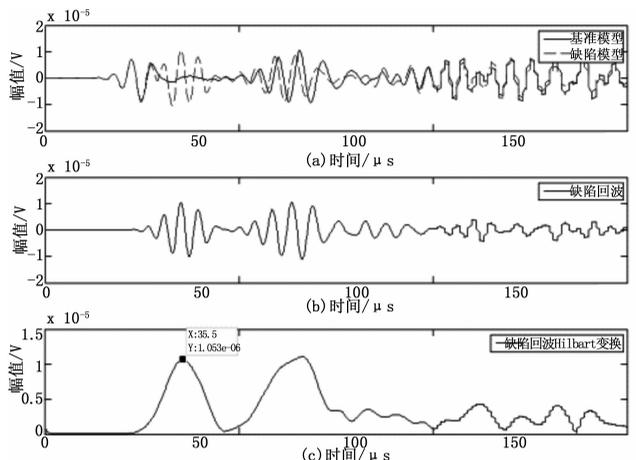


图 20 收发传感器位置分别在 (156, 10) 与 (216, 10) 时的仿真结果

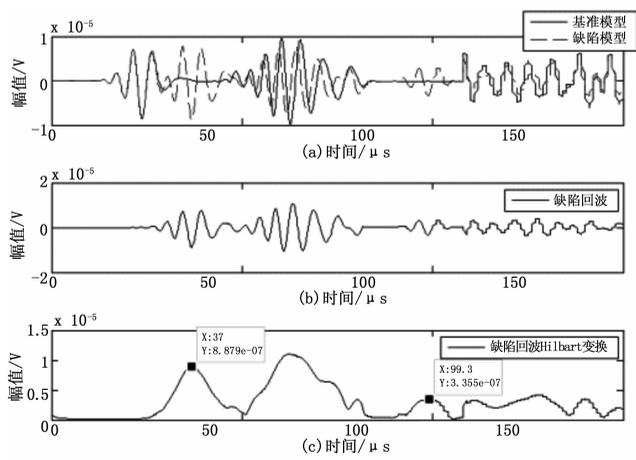


图 21 收发传感器位置分别在 (156, 0) 与 (216, 0) 时的仿真结果

中间位置, 上下底面的回波会与 MP-W 的路径严重重叠, 且两个底面反射回来的波干涉严重, 会使分析更加困难。

在图 13 至图 19 中, 难以判断 DRP 与 MP-W 的出现时间, 主要是由于收发传感器的向 $-y$ 方向逐渐移动时, 上下底面的反射回波会造成严重的干扰, 这给回波分析带来了困难。在图 12 与图 20 中, 两者的方针效果一样, 且能够较为清楚的判断直接反射路径 DRP 的出现时间, 但不能确定 MP-W 出现的时间, 主要是由于当收发传感器的向 $-y$ 方向移动

1 次后, 上下边界的反射回波对 MP-W 的判断出现了干扰出现了重叠现象, 以及 Lamb 波传播过程中的不同路径波的干涉所造成的。

从图 21 中可以容易判断出 DRP 与 MP-W 的延迟时间, 由于对称关系, 图 21 与 2.1 节模型中图 7、图 8 的结果一致, 由于图 21 的收发传感器位于边界位置, 且是对边界节点进行的激励加载, 所以避免了底面反射回波所带来的干扰, 能够得到较为满意的结果。所以当缺陷位于中心位置不变时, 收发传感器处在边界上会是仿真观察的最佳效果。

2.3 相同传感器位置, 相同缺陷大小不同缺陷位置

与 2.2 节相类似的, 为了从不同角度验证多途超声检测法在薄板上的检测能力, 我们令收发传感器的位置保持在 S_t 与 R_t 不变, 即坐标 (156, 100) 与 (216, 100)。让缺陷的大小固定为 8 mm 直径的圆孔, 使其从缺陷中心为 (186, 50) 的位置按每次步长为 10 mm 向 $-y$ 方向移动, 总共移动 5 次, 并对每次移动后的模型进行 ANSYS 建模仿真。其原理图如下图 22 所示。

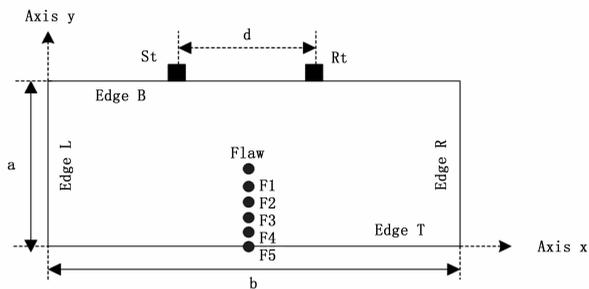


图 22 相同传感器位置不同缺陷位置的模型

图 22 中, 对应的不同缺陷位置的坐标分别为:

$$F_1:(186,40)、F_2:(186,30)、F_3:(186,20)、F_4:(186,10)、F_5:(186,0)。$$

其他的条件相对与 2.2 节的仿真条件不变。当缺陷位于不同的位置, 即 $F_1、F_2、F_3、F_4$ 与 F_5 时, 每种情况下 ANSYS 的仿真结果如图 23~图 27 所示。由于当缺陷的中心位于 $F_5:(186,0)$ 时, 已不适用与超声多途检测方法的应用, 于是不对此种情形进行建模仿真。

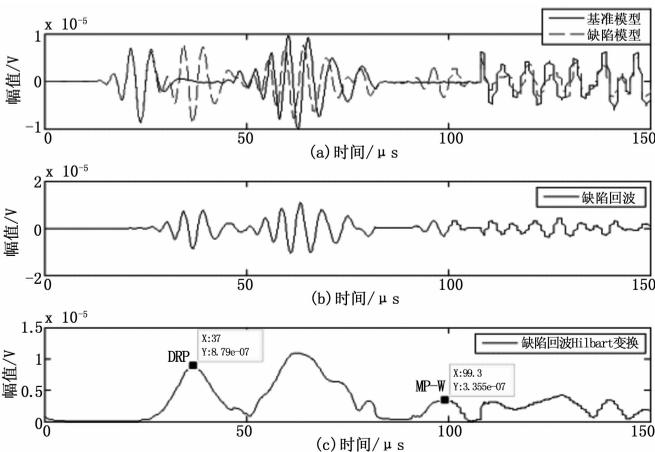


图 23 缺陷的中心坐标为 (186, 50) 时的仿真结果

从图 23 中我们可以清楚地看到在缺陷中心坐标为 (186,

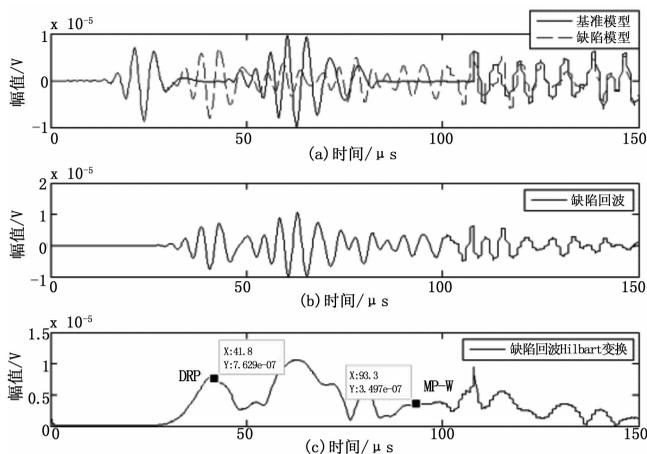


图 24 缺陷的中心坐标为 (186, 40) 时的仿真结果

50) 时, ANSYS 建模仿真的结果, 从图 23 我们可以得到直接反射路径 DRP 的延迟时间为 $37 \mu s$, MP-W 的时间为 $99.3 \mu s$, 由于之前在 2.1 节中我们计算得到 Lamb 的群速度为 $v_g = 2987.29 \text{ m/s}$, 所以将时间带入公式 (3) 与公式 (4), 可以计算得到缺陷的顶点坐标与底点坐标分别为 (186, 53.59) 与 (186, 45.25), 此时可以计算得到缺陷的直径为 8.34 mm 与 ANSYS 实际模型模拟的缺陷 8 mm 十分的接近。

仿真结果最后所造成的缺陷的误差主要是由于 ANSYS 建模在圆孔缺陷以及传感器附近网格划分不均, 以及当缺陷越小时, 经过缺陷的衍射波会对底面波形成更加严重的干涉所造成的。

从图 24 中还是可以较为清楚地看到在缺陷中心坐标为 (186, 40) 时, 对其进行 ANSYS 建模仿真的结果, 从图 24 (c) 中缺陷回波的 Hilbert 变换可以得到, 直接反射路径 DRP 的延迟时间为 $41.8 \mu s$, MP-W 路径的延迟时间为 $93.3 \mu s$, 同样的将其带入公式 (3) 和公式 (4) 中, 可以计算得到缺陷的顶点坐标与底点坐标分别为 (186, 45.25) 与 (186, 36.09), 此时可以计算得到缺陷的直径为 9.16 mm。

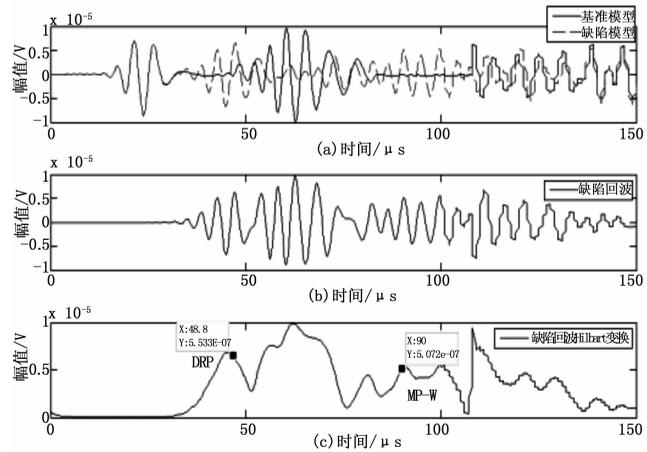


图 25 缺陷的中心坐标为 (186, 30) 时的仿真结果

图 25 表示在缺陷中心坐标为 (186, 30) 时, ANSYS 建模仿真的结果。从图 25 (c) 中缺陷回波的 Hilbert 变换可以得到, 直接反射路径 DRP 的延迟时间为 $46.8 \mu s$, 但是对于 MP-W 的延迟时间判断出现了干扰, 我们经过思考最终认为

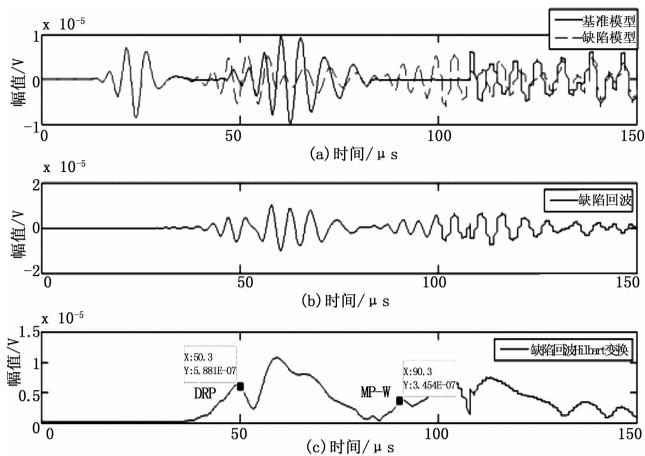


图 26 缺陷的中心坐标为 (186, 20) 时的仿真结果

MP-W 路径的延迟时间为 $90 \mu\text{s}$ ，可以见到在图 25 (c) 中 MP-W 周围出现了 3 个 Hilbert 变换峰值，主要是由于随着缺陷中心的下移，底部反射回波的传播路径与缺陷底点较为相近，从而部分的回波造成了干涉，导致 MP-W 的路径回波时间更加持久。

同样的将其带入公式 (4) 与公式 (3)，可以计算得到缺陷的顶点坐标与底点坐标分别为 (186, 36.86) 与 (186, 31.04)，此时可以计算得到缺陷的直径为 5.82 mm。

图 26 表示在缺陷中心坐标为 (186, 20) 时，ANSYS 建模仿真的结果。从图 26 (a) 中我们可以看到，直接反射路径 DRP 回波的延迟时间已经伴随着缺陷中心的下移而逐渐往后移，并与底面回波的延迟时间较为相近，但此时还是可以区分出 DRP 的延迟时间，从图 26 (c) 中缺陷回波的 Hilbert 变换可以得到，直接反射路径 DRP 的延迟时间为 $50.3 \mu\text{s}$ 。对于 MP-W 的延迟时间判断较为困难，因为随着缺陷中心的下移，MP-W 传播的路程变短，导致底面回波对于 MP-W 路径的影响加大，我们经过思考最终认为 MP-W 路径的延迟时间为 $90.3 \mu\text{s}$ ，可以见到在图 26 (c) 中 MP-W 周围出现了若干个 Hilbert 变换峰值，主要是由于随着缺陷中心的下移，底部反射回波的传播路径与缺陷底点较为相近，从而部分的回波造成了干涉，并且两者到达接收节点的时间相近，导致 MP-W 的路径的延迟时间确定更为困难。

同样的将其带入公式 (3) 与公式 (4)，可以计算得到缺陷的顶点坐标与底点坐标分别为 (186, 31.12) 与 (186, 31.5)，此时可以计算得到缺陷的直径为 -0.38 mm 。在图 27 中，此时缺陷中心的坐标为 (186, 10)，与底面十分的接近。从图 27 (a) 中看出直接反射路径 DRP 与底面回波已经重叠在一起，不能判断出其延迟时间。再者缺陷的底点与地面的距离只有 6 mm，MP-W 的路径检测会受到底面多次反射、散射的干扰，或者与底面回波重叠，从而很难对 MP-W 的延迟时间进行估计。

从图 23 至图 27 的仿真结果可以看出，在缺陷中心位于 (186, 50) 与 (186, 40) 时，对于 Lamb 波多途检测路径 DPR 与 MP-W 延迟时间的判定不存在干扰；当缺陷中心位于 (186, 30) 与 (186, 20) 时，此时对于路径 DPR 延迟时间的估计较为清晰，但是对于 MP-W 延迟时间的确定却出现

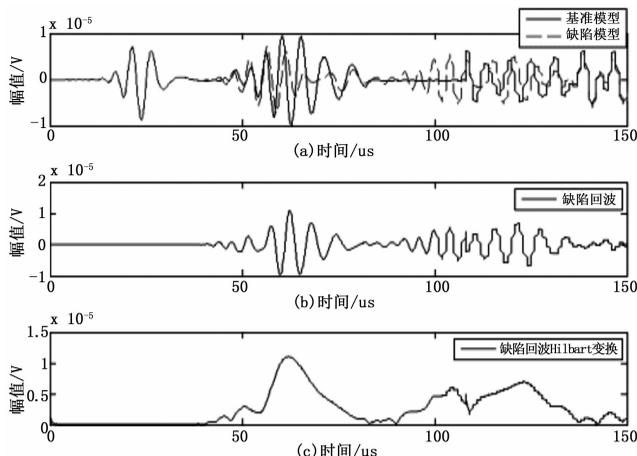


图 27 缺陷的中心坐标为 (186, 10) 时的仿真结果

了较为严重的干扰；当圆孔缺陷中心位于 (186, 10) 时，已经不能判断出 DRP 与 MP-W 的延迟时间。

从表 2 中我们可以看到，在图 23 至图 27 的仿真结果中，ANSYS 建模时缺陷的大小为直接 8 mm 的圆孔，在不同缺陷中心位置，建模仿真并计算得到了不同模型的缺陷大小以及相对误差。从表 2 可以看到在缺陷中心位置为 (186, 50) 时，仿真所得的结果最为相近，随着缺陷中心的下移，ANSYS 仿真得到的缺陷的大小相对误差越大，乃至在 (186, 20) 与 (186, 10) 时，判断缺陷的大小出现了严重的错误。

表 2 相同传感器位置不同缺陷位置模型之间的比较

缺陷中心坐标	实际缺陷大小/mm	仿真计算大小/mm	相对误差/(%)
(186,50)	8	8.34	4.25
(186,40)		9.16	14.5
(186,30)		5.82	27.25
(186,20)		-0.38	104.75
(186,10)		无	

综上所述，当缺陷中心位于 (186, 50) 时，结果最为准确，仿真效果最好，且此时的多途检测能力最强，随着缺陷中心的下移，对于多途路径 DRP 与 MP-W 的延迟时间的判断越来越难，主要是由于底面回波到达接收节点的时间与缺陷回波到达接收节点的时间越来越相近，并且当缺陷位于底面附近时，底面回波会与 MP-W 路径的回波相成较为严重的干涉，导致传播时间无法预估。所以当缺陷位于板的中心附近，且从薄板的边界激励，Lamb 波多途检测效果最佳。且超声多途检测方法只需通过单次测量就可以对缺陷进行定位并测出其大小是可行的。仿真结果最后所造成的缺陷的误差主要是由于 ANSYS 建模在圆孔缺陷以及传感器附近网格划分不均，以及当缺陷越小时，经过缺陷的衍射波会对底面波形成更加严重的干涉所造成的。

3 结论

利用超声多途提供的额外数据来检测金属薄板的缺陷，提出相应的算法，多途路径在直接反射的路径上是可以预测和识别的，直接反射路径是相对比较容易识别的。同时利用 ANSYS 有限元建模不同的薄板缺陷模型，在不同的传感器位置、

缺陷位置、缺陷大小情况下分别进行仿真。实验表明超声多途所提供的额外数据能够用于薄板缺陷的检测。

本文主要根据超声多途 Lamb 波检测法原理, 建立了一种单发射单接收的传感器检测模型, 研究了其中的关键技术, 并应用于金属铝合金薄板探伤, 在应用领域和应用技术方面取得了新的进展; 通过 ANSYS 仿真和实验检测验证了超声多途的可行性; 提出的超声多途检测方法, 通过单次测量即可检测出薄板缺陷的位置和大小, 具有良好的检测性能。

参考文献:

- [1] Meksen T M, Boudraa B, Draï R, et al. Automatic crack detection and characterization during ultrasonic inspection [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2010, 29 (3): 169-174.
- [2] Lester W. Schmerr Jr, Sung-Jin Song. *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems Models and Measurements* [M]. Springer Science Business Media, New York, USA, 2007.
- [3] Fukuda M, Imano K, Yamagishi H, et al. Detection of the Second Harmonics of Lamb Waves in Fatigued Magnesium Plates [J]. *Acoustical Science and Technology*, 2011, 32 (6): 271-275.
- [4] Dewhurst R. J, Edwards C, Mckie A. D. W, et al. Estimation of the thickness of thin metal sheet using laser generated ultrasound [J]. *Applied Physics Letters*, 1987, 51 (14): 1066-1068.
- [5] Hutchins D A, Lundgren K, Plamer S B. A Laser Study of Transient Lamb Waves in Thin Materials [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1989, 85 (4): 1441-1448.
- [6] Rose J L. *Ultrasonic Waves in Solid Media* [M]. UK: Cambridge

University Press, 1999.

- [7] Ostachowicz W, Kudela P, Malinowski P, et al. Damage Localization in Plate-like Structures Based on PZT Sensors [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23: 1805-1829.
- [8] Park H W, Sohn H, Law K H, et al. Time Reversal Active Sensing for Health Monitoring of A Composite Plate [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 302 (1-2): 50-66.
- [9] 冯勇明, 周丽. 基于 Lamb 波时间反转的复合材料结构损伤检测 [J]. *中国机械工程*, 2011, 22 (20): 2476-2480.
- [10] Shen X Z, Pan L. material Flaw Sizing By Ultrasonic Multipath Detection [J]. *Periodical of Advanced Materials research* vol. 712-715, pp: 1067-1070.
- [11] 袁慎芳. *结构健康监控* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [12] 何存富, 李隆涛, 吴斌. 周向超声导波在薄壁管道中的传播研究 [J]. *实验力学*, 2002, 17 (4): 419-424.
- [13] 赵彩萍, 王维斌, 何存富, 等. 基于神经网络模型的超声导波管道缺陷识别 [J]. *传感器与微系统*, 2009, 28 (11): 19-21.
- [14] 李富才, 孟光. 窄频带 Lamb 波频散特性研究 [J]. *实验力学*, 2002, 17 (4): 419-424.
- [15] 王军, 王寅观. 板中正交静应力与任意方向兰姆波波速的关系 [J]. *力学学报*, 2008, 40 (3): 345-354.
- [16] 代树武, 张海澜, 粗糙界面板 Lamb 波的传播特征 [J]. *声学学报*, 2003, 28 (3): 193-200.
- [17] 阎石, 张海风, 蒙彦宇. Lamb 波频散曲线的数值计算及试验验证 [J]. *华中科技大学学报 (城市科学版)*, 2010, 27 (1): 1-4.

(上接第 19 页)

- [2] 赵李坤. 基于人脸特征识别的驾驶员疲劳检测方法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [3] 李志春. 驾驶员疲劳状态检测技术研究及工程实现 [D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- [4] Mao M, Du L. Research on drive fatigue detection using wavelet transform [J]. *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2007: 1-4.
- [5] 王奕直, 周凌霄, 孔万增. 基于 Adaboost 的疲劳驾驶眨眼检测 [J]. *杭州电子科技大学学报*, 2013 (4): 35-38.
- [6] 李强. 基于 PERCLOS 的列车司机驾驶疲劳检测研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [7] 文岐伟. 基于疲劳检测和运动目标检测与识别的预警系统 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [8] 夏阿南. 基于人眼动态特性的驾驶疲劳检测方法研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- [9] 姜兆普, 许勇, 赵检群. 基于眼部特征的疲劳检测算法 [J]. *计算机系统应用*, 2014 (8): 90-9.
- [10] 文迪, 何智翔, 丁晓青, 等. 基于 LBP 和 CCS-AdaBoost 的多视角人脸检测 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2013 (4): 622-629.
- [11] 孙建维. 基于 LBP 的人脸识别 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [12] 邬敏杰, 穆平安, 张彩艳. 基于眼睛和嘴巴状态的驾驶员疲劳检测

算法 [J]. *计算机应用与软件*, 2013 (03): 25-27.

- [13] Mandalapu Saradadevi P B. Driver Fatigue Detection Using Mouth and Yawning Analysis [J]. *International Journal of Computer Science & Network Security*, 2008, (6): 183-188.
- [14] 毕明伟. 疲劳驾驶检测系统设计与开发 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [15] 刘宏, 李锦涛, 苗军. 多方法融合来解决人脸检测中的光照补偿 [J]. *系统仿真学报*, 2001 (S2): 486-489.
- [16] 胡国胜, 钱玲, 张国红. 支持向量机的多分类算法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2006 (1): 127-132.
- [17] 赵海洋, 徐敏强, 王金东. 改进二叉树支持向量机及其故障诊断方法研究 [J]. *振动工程学报*, 2013, 26 (5): 764-770.
- [18] 杨燕, 靳蕃, Mohamed K. 聚类有效性评价综述 [J]. *计算机应用研究*, 2008, 25 (6): 1630-163.
- [19] 宋媛. 聚类分析中确定最佳聚类数的若干问题研究 [D]. 延吉: 延边大学, 2013.
- [20] 奉国和. SVM 分类核函数及参数选择比较 [J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47 (3): 123-128.
- [21] Shalev-Shwartz S, Srebro N. SVM optimization: Inverse dependence on training set size [J]. *International Conference on Machine Learning*, 2008, 11 (2): 112-117.
- [22] 王赞超. 基于 Android 平台的视觉手势识别研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.