◇ 研究报告 ◇

铝板裂纹缺陷兰姆波阵列瞬时相位包络 成像及补偿*

范佳伟^{1,2} 李光海^{2†} 王 强¹

(1 中国计量大学质量与安全工程学院 杭州 310018)(2 中国特种设备检测研究院 北京 100029)

摘要 针对板结构中多裂纹缺陷的识别和定位问题,提出了瞬时相位全聚焦成像的包络算法以及基于激励信 号脉冲时长的波速补偿方法。通过数值仿真和实验,验证了波速补偿后的瞬时相位包络全聚焦成像对多缺陷 的识别和定位能力。结果表明:与幅值全聚焦成像相比,该方法可以有效减小噪声、直达波、端面回波引起的虚 像,提高缺陷的识别率;与相位全聚焦成像相比,该方法可以实现缺陷处的单峰值聚焦,更便于缺陷的定位。使 用该成像算法在1000 mm × 500 mm × 1 mm的铝板上对实现了5个缺陷的成像和定位,其定位的平均误差 为12.24 mm。

关键词 兰姆波,超声阵列,瞬时相位包络算法,波速补偿,全聚焦成像 中图法分类号:O429 文献标识码:A 文章编号:1000-310X(2019)06-0993-06 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.06.012

Instantaneous phase envelope imaging and compensation in aluminum plate using array of Lamb waves

FAN Jiawei^{1,2} LI Guanghai² WANG Qiang¹

(1 College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

(2 China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract Aiming at the problem of the identification and location of multi-crack in the plate structure, an envelope algorithm for instantaneous phase total focus imaging and a velocity compensation method based on the pulse duration of the excitation signal are proposed. The ability of identifying and locating multi-crack by instantaneous phase envelope total focus imaging after velocity compensation is verified by numerical simulation and experiment. The results show that compared with amplitude total focus imaging, this method can effectively reduce the virtual image caused by noise, direct wave and end echo, and improve the recognition rate of defects. Compared with phase total focus imaging, this method can achieve single-peak focusing at the defect and facilitate the positioning of defects. Five defects are imaged and located on the aluminum plate using the imaging algorithm and the average error of the location was 12.24 mm.

Key words Lamb wave, Ultrasonic array, Instantaneous phase envelope algorithm, Wave velocity compensation, Total focus imaging

²⁰¹⁹⁻⁰²⁻²⁴ 收稿; 2019-07-01 定稿

^{*}国家重点研发计划项目(2016YFF0203002)

作者简介:范佳伟(1994-),男,浙江嘉兴人,硕士研究生,研究方向:超声无损检测技术。

[†]通讯作者 E-mail: liguanghai@tsinghua.org.cn

0 引言

金属板类结构广泛应用于汽车制造、船用设备、 航空航天等领域,由于受到加工工艺、运输及使用 环境的影响,在板结构表面和内部易产生孔洞、裂 纹、腐蚀等不同类型的缺陷,严重影响设备的使用 安全,因此开展对金属板结构的缺陷检测技术研究 具有重要意义和应用前景。兰姆(Lamb)波相较于 体波具有衰减小、传播距离远、检测效率高的优点 而适用于板类结构的大范围检测。进一步采用超声 阵列技术,对阵列信号进行成像处理可以有效提高 缺陷检测的准确性和直观性。如Prasad等^[1]采用2 个线性阵列分别激励和接收Lamb波,对板材进行 层析成像,可以实现对孔洞缺陷区域识别。郭方宇 等^[2]提取参考信号和损伤信号的相关性,通过损伤 概率重建实现了铝板上腐蚀缺陷的定位。但是上述 方法需要无损情况下的参考信号作为对比,不利于 实时检测缺陷。

利用超声阵列换能器采集全矩阵数据,通过全 聚焦成像方法可以实现成像的实时性。刘增华等[3] 采用磁致伸缩传感器阵列激励接收Lamb波,通过 成像处理实现铝板中单缺陷的识别和定位。Wilcox 等^[4]、Holmes等^[5]在全聚焦成像的基础上,将线性 阵列进行子阵列划分,增加了全矩阵数据的利用 率,计算子阵列数据的方向矢量,并对子阵列数据 进行合成得到缺陷的方向矢量,可以表征缺陷的类 型及裂纹方向。焦敬品等^[6]将全聚焦成像和矢量聚 焦方式结合,并运用到板结构Lamb波阵列成像中, 得到矢量全聚焦图像,可以有效识别板结构中裂纹 缺陷和方向。Prado等^[7-8]提出了利用导波中的相 位信息,采用全聚焦成像方法,对铝板进行相位成 像,可以减少虚像影响,但是由于相位的不连续性, 在一个缺陷成像处会产生多个聚焦点,从而造成缺 陷误判。上述成像算法中并未考虑到Lamb波波长 和激励时长对缺陷成像的影响,进而导致缺陷定位 不够准确。

为了减少噪声对成像质量的影响,解决多峰值 聚焦点引起的缺陷误判问题,本文在相位全聚焦成 像的基础上,提出了瞬时相位全聚焦成像的包络算 法。并分析了激励信号对缺陷定位的影响,提出了 波速补偿方法,可以有效减小缺陷定位误差,通过数 值仿真和实验分析实现了铝板中多缺陷的识别和 定位。

1 成像原理

1.1 幅值全聚焦成像

全聚焦成像依赖于全矩阵捕捉(Full matrix capture)数据,全矩阵数据是指将换能器阵列中所有阵元依次作为发射-接收组合,采集得到所有超声回波时域信号^[9],对于*N*个阵元的换能器阵列,共采集*N*²组时域信号。

幅值全聚焦成像算法利用了全矩阵数据中的 幅值信息,针对成像区域中的每一个离散点P,通过 虚拟聚焦,将所有回波数据中与该点坐标相对应时 间的幅值进行叠加成像,获得表征该点信息的幅值 强度 *I*(*x*,*z*)。每个离散点*P*的幅值强度 *I*(*x*,*z*)可 以表示为^[10]

$$I(x,z) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} B_{ij}(x,z) v_{ij}(\tau_{ij}(x,z)), \quad (1)$$

其中, $B_{ij}(x, z)$ 为激励阵元 i 经过离散点 P(x, z)到接收阵元 j 的距离补偿因子, $v_{ij}(t)$ 为时域信 号, $\tau_{ij}(x, z)$ 为Lamb 波由激励阵元 i 到达成像点 P(x, z) 散射后,再到接收阵元 j 的导波传播时间, 其表达式为

$$\tau_{ij}(x,z) = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + z^2} + \sqrt{(x_j - x)^2 + z^2}}{c}.$$
(2)

1.2 瞬时相位全聚焦成像

瞬时相位成像将时域信号 $\nu_{ij}(t)$ 替换为信号的瞬时相位 $\varphi_{ij}(t)$,表征每个离散点P的相位强度 $I_{\varphi}(x,z)$ 表示为^[6]

$$I_{\varphi}(x,z) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \varphi_{ij}(\tau_{ij}(x,z)), \quad (3)$$

其中,瞬时相位 $\varphi_{ij}(t)$ 由式(4)得到

$$\varphi_{ij}\left(t\right) = \arctan\left(\frac{\widehat{v}_{ij}\left(t\right)}{v_{ij}\left(t\right)}\right),\tag{4}$$

其中, $\hat{v}_{ij}(t)$ 是 $v_{ij}(t)$ 的Hilbert变换。

1.3 瞬时相位包络全聚焦成像

为了减少超声导波传播过程中的多模态和频 散效应影响,激励信号采用多周期的窄带信号。而 信号的瞬时相位在-π到π处存在不连续的现象, 因此瞬时相位成像图中一个缺陷会产生多峰值的 聚焦点,从而识别为多个缺陷。为了减少多峰值聚 焦点引起的误判缺陷,提出瞬时相位成像的包络 形式为

$$I_{\varphi}(x,z) = \frac{1}{N^{2}} \left\{ \left[\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \sin(\varphi_{ij}(\tau_{ij}(x,z))) \right]^{2} + \left[\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \cos(\varphi_{ij}(\tau_{ij}(x,z))) \right]^{2} \right\}^{\frac{1}{2}} .$$
 (5)

2 缺陷识别数值仿真

2.1 仿真模型及成像结果

基于 ABAQUS 有限元仿真软件,进行超声导 波在三维薄铝板中的传播特性及成像算法研究。有 限元仿真模型为1000 mm×500 mm×1 mm 铝板, 如图 1 所示在铝板不同位置设定了 5 个不同角度的 通透型裂纹缺陷,裂纹角度分别为45°(裂纹1)、25° (裂纹2)、5°(裂纹3)、35°(裂纹4)、55°(裂纹5),大 小均为5 mm×2 mm。在仿真模型中心上设置 8 个 线性排列的激励接收点,采用双元激励法^[11],在板 的上下表面节点上施加反对称的集中力,从而激励 单一 S0 模态的 Lamb 波。激励信号采用中心频率为 300 kHz 的汉宁窗调制 5 周期正弦信号。





利用ABAQUS软件建立仿真模型,并在 ABAQUS/Explicit模块中进行求解,以8个激励 接收点上垂直于板平面方向的位移值作为接收信 号。对于8个激励接收阵元共产生64组全矩阵时域 信号,并将其导入Matlab中进一步成像处理。1号 阵元激励、所有阵元接收的归一化信号如图2所示, 由于在1号阵元上施加了激励信号后,该节点的位 移约束自动设置为0,因此其接收信号中只包含了 激励信号所产生的位移,不能有效反映缺陷回波信 号,可以在后处理中将自激自收的8个信号置0处 理,以减小误差影响。

根据仿真所得的全矩阵数据,提取其中的幅值 和相位信息,分别进行幅值全聚焦和相位全聚焦成 像,结果如图3所示,幅值全聚焦以dB为尺度、相位 全聚焦以线性为尺度作阈值处理。





Fig. 3 Simulation results of three total focus imaging methods

可以看出三种成像方法均能对5个裂纹缺陷进 行成像识别。幅值全聚焦图像中受到直达波和端面 回波影响,在阵列布置区域和成像边界处会有较大 强度的虚像产生,从而产生盲区,导致成像的对比度 和信噪比降低,因此不利于没有先验情况下对缺陷 的识别。而相位全聚焦成像中,由于多周期信号的 瞬时相位不连续性,在5个缺陷处有多个峰值的聚 焦点,因此不利于缺陷的定位。在瞬时相位包络全 聚焦成像中,5个缺陷处的聚焦强度较高,所存在的 虚像强度均低于缺陷处的强度,并且缺陷附近只有 一个高强度的聚焦点,因此合理设置阈值即可有效 识别和定位缺陷。为了进一步分析三种成像方式的 检测效果,以缺陷3中心横坐标*x* = 550处提取沿*z* 方向分布的强度曲线,其归一化曲线如图4所示。



图 4 沿缺陷 3 中心 z 方向强度曲线图 Fig. 4 Strength curve along the z direction of defect 3

由z方向强度曲线可以看出,幅值全聚焦成像 受近场区的直达波和边界处的反射波影响,导致在 板的两侧产生较高的声波反射区,缺陷散射回波的 聚焦强度值相对较小。对于瞬时相位全聚焦成像, 由于将时域幅值信号转换成相位信号,直达波、缺陷 的散射回波、端面回波信号都转换为(-π,π)的瞬 时相位值,因此在缺陷附近(400~500 mm)表现为 强度值高度聚焦,但是在缺陷附近产生了多个波峰 的强度值。在瞬时相位包络全聚焦的强度曲线中, 缺陷附近的强度值高于幅值全聚焦,并且在正常区 (50~450 mm)的强度值均低于幅值成像,因此瞬时 相位包络全聚焦成像具有更好的信噪比,降低了缺 陷的误检率。除此之外,相位包络全聚焦在缺陷附 近只表现为一个聚焦峰值,因此更容易对缺陷进行 定位。

2.2 缺陷的定位及补偿

缺陷的分辨率受到脉冲持续时间 Lamb 波传播 速度的影响,即取决于激励信号的周期数和 Lamb 波的波长。在数值仿真中激励信号采用中心频率 为300 kHz 的汉宁窗调制 5 周期正弦信号,产生的 S0 模态 Lamb 波的波长为 18 mm,在一个激励信 号的周期内 Lamb 传播距离为90 mm。因此即使 是数值仿真远小于波长的 5 mm×2 mm裂纹缺陷, 在缺陷成像图中会显示为数倍于实际大小的形状, 以相位包络成像中缺陷 3 为例,其成像大小约为 64 mm×32 mm 的矩形。对于缺陷定位坐标一般 取成像中的缺陷区域的强度最大值处,缺陷 3 的定 位坐标为(555,431),与实际位置(550,400)相比较, 缺陷 3 的横坐标定位较为准确,其纵坐标定位误差 较大。

Lamb 波的波速 c 由端面回波到达时间和传播 距离计算而得,在成像算法中,由于受 Lamb 波长及 激励信号周期的影响,缺陷定位会有相应的"延迟" 效应。为了补偿缺陷定位的误差,可以通过波速补 偿法进行定位补偿,补偿后的波速 c 由式(6)可得

$$c = 2L/(t + t_a/2),$$
 (6)

其中, *L*为换能器阵列与边界的距离, *t*为端面回 波的到达时间, t_a 为激励信号的持续时间。通过仿 真信号计算, 实际波速 c = 5310 m/s, 补偿后波速 c = 5020 m/s, 波速补偿后的相位包络成像如图5 所示, 补偿后由于波速减小, 导致成像图中对端面 回波信号也进行聚焦。表1给出了波速补偿前后 各个缺陷的定位坐标。经过波速补偿后, 5个缺陷 的定位误差显著减小, 补偿前5个缺陷的定位误差 平均值为26.38 mm, 补偿后的定位误差平均值为 12.94 mm, 有效提高了缺陷的定位精度。此外5个



图5 补偿后的相位包络全聚焦成像

Fig. 5 Compensated phase envelope total focus imaging

缺陷的定位精度有一定差异,其原因是因为不同缺陷相对于阵列位置不同,位于阵列垂直方向的缺陷 3的定位误差最小,由缺陷3向水平方向扩展定位误 差逐渐增大。

表1 仿真数据的缺陷定位 Table 1 Defect location of simulation data

缺陷编号	实际坐标	补偿前		补偿后	
		坐标	误差/mm	坐标	误差/mm
1	(340, 160)	(322, 179)	26.2	(340,177)	17.0
2	(390, 250)	(379, 270)	22.8	(389, 261)	11.0
3	(550, 400)	(556, 421)	21.8	(551, 408)	8.1
4	(690, 310)	(710, 336)	32.8	(687, 325)	15.3
5	(750, 200)	(765, 224)	28.3	(747,213)	13.3

3 缺陷识别实验研究

3.1 实验装置

图6给出了Lamb波缺陷成像实验系统装置 图。该系统硬件由工控机、多通道同步数据 采集卡(PCIAD1650)、多通道超声激励相控阵 板卡(PHA16T)等组成^[12]。待检测铝板尺寸为 1000 mm×500 mm×1 mm,其材料参数、缺陷 尺寸及分布与仿真相同。Lamb波换能器线性阵 列由8片矩形压电阵元组成,其尺寸均为6 mm× 6 mm×0.5 mm,阵元间距2 mm,通过502胶水耦 合于铝板边缘。



图 6 Lamb 波成像系统装置 Fig. 6 Lamb wave imaging system device

3.2 成像结果和定位分析

与数值仿真中的双元激励法不同,在实际检测 情况中,大多只能单面激励Lamb波。因此在检测实 验中只在铝板一侧表面上布置线性阵列,并与仿真 中激励信号相同,激励中心频率为300 kHz的汉宁 窗调制5周期正弦信号,系统采样频率为50 MHz, 每组信号共采样20000个点,能完全对铝板进行扫 查,实验获取阵列回波信号如图7所示,由于噪声干 扰和Lamb波频散现象导致多个缺陷的回波信号发 生混叠。





根据阵列信号端面回波到达时间计算波速*c*, 端面回波到达平均时间为186 μs,所以Lamb波的 波速*c*为5366 m/s,与理论值相近,补偿后波速为 5154 m/s,图8为补偿前后的瞬时相位包络成像图, 其中图8(b)下方中心最亮的区域为波速补偿后对 端面回波信号的聚焦成像结果。





Fig. 8 Instantaneous phase envelope imaging

各个缺陷的定位坐标如表2所示。实验数据成 像结果与仿真结果相似,补偿前5个缺陷的定位误 差平均值为24.58 mm,补偿后的定位误差平均值

表2 实验数据的缺陷定位

Table 2Defect location of experimentaldata

缺陷编号	实际坐标	补偿前		补偿后	
		坐标	误差/mm	坐标	误差/mm
1	(340, 160)	(321, 174)	23.6	(334, 173)	14.3
2	(390, 250)	(374, 267)	23.2	(384, 258)	10.0
3	(550, 400)	(551, 417)	17.0	(546, 401)	4.1
4	(690, 310)	(698, 329)	20.6	(683, 320)	12.2
5	(750, 200)	(756, 238)	38.4	(755, 220)	20.6

4 结论

针对板结构中多裂纹缺陷的识别和定位问题, 本文进行了板结构Lamb波阵列成像方法研究,得 出以下结论:

(1)提出了瞬时相位全聚焦成像的包络形式和 定位补偿方式,通过数值仿真实现了铝板上多裂纹 缺陷的检测和定位。

(2) 通过实验验证了经过波速补偿后的瞬时相 位包络成像方法可以有效减小缺陷的定位误差,经 过波速补偿后的缺陷定位平均误差为12.24 mm。

参考文献

- Prasad M S, Balasubramaniam K, Krishnamurthy C V. Structural health monitoring of composite structures using Lamb wave tomography[J]. Smart Materials & Structures, 2004, 13(5): 73–79.
- [2] 郭方宇, 袁慎芳, 鲍峤. 基于导波的飞机结构腐蚀损伤监测研究 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(7): 70-76.
 Guo Fangyu, Yuan Shenfang, Bao Qiao. Research on corrosion damage monitoring of aircraft structure based on guided wave[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(7): 70-76.
- [3] 刘增华, 钟栩文, 李欣, 等. 基于全向性 SH₀ 模态磁致伸缩 贴片型传感器阵列的铝板缺陷成像研究 [J]. 机械工程学报,

Liu Zenghua, Zhong Xuwen, Li Xin, et al. Research on damage imaging based on omnidirectional SH_0 mode magnetostrictive patch transducers array in aluminum plates[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14): 8–15.

- [4] Wilcox P D, Holmes C, Drinkwater B W. Advanced reflector characterization with ultrasonic phased arrays in NDE applications[J]. Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control IEEE Transactions on, 2007, 54(8): 1541–1550.
- [5] Holmes C, Drinkwater B W, Wilcox P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation[J]. NDT & E International, 2005, 38(8): 701–711.
- [6] 焦敬品,李勇强,杜礼,等.板结构裂纹兰姆波阵列复合成像 方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 593-601. Jiao Jingpin, Li Yongqiang, Du Li, et al. Study on the compound imaging method for crack detection in plate structure using array of Lamb waves[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(3): 593-601.
- [7] Prado V T, Higuti R T, Kitano C. Instantaneous phase threshold for reflector detection in ultrasonic images[J]. Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control IEEE Transactions on, 2014, 61(7): 1204–1215.
- [8] Prado V T, Higuti R T, Kitano C, et al. Lamb mode diversity imaging for non-destructive testing of plate-like structures[J]. NDT & E International, 2013, 59(7): 86–95.
- [9] 王冲, 毛捷, 廉国选. 阵元固体指向性补偿对超声全聚焦成像的优化研究 [J]. 应用声学, 2018, 37(5): 732-737.
 Wang Chong, Mao Jie, Lian Guoxuan. The optimization for ultrasonic total focusing method of solid directivity compensation of array element[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(5): 732-737.
- [10] 周正干, 彭地, 李洋, 等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成 像算法及其校准研究 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 1–7. Zhou Zhenggan, Peng Di, Li Yang, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 1–7.
- [11] 郑阳,何存富,吴斌,等.采用超声导波阵列技术研究板类结构大面积检测 [J]. 声学学报, 2013, 38(1): 71–79.
 Zheng Yang, He Cunfu, Wu Bin, et al. Guided wave arrays for large plate structures inspection[J]. Acta Acustica, 2013, 38(1): 71–79.
- [12] 吴斌, 刘麒, 焦敬品, 等. 调谐兰姆波在模态控制中的实验研究 [J]. 实验力学, 2011, 26(6): 639-644.
 Wu Bin, Liu Qi, Jiao Jingpin, et al. Experimental research of lamb wave tuning in model control[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(6): 639-644.