

文章编号:1001-4888(2018)05-0734-09

去除 Lamb 波频散的线性映射法^{*}

骆英, 徐彩军, 徐晨光, 徐桂东, 杨国英, 王自平

(江苏大学 土木工程与力学学院, 高端装备关键结构健康管理国际联合研究中心, 江苏镇江 212013)

摘要: Lamb 波常被用于板壳结构的无损检测, 然而 Lamb 波的频散效应会导致板中损伤反射信号的渡越时间信息无法准确提取, 因而影响损伤定位及成像的精度。本文引入线性映射方法, 用线性频率一波数关系取代原有非线性的频散关系, 从而去除激励中心频率附近的频散效应。分别采用数值模拟和实验的方法分析了频散去除的效果, 进而结合相控阵成像算法对金属板中的损伤进行成像研究。结果表明, 利用线性映射法去除频散可以显著提高含损伤散射信号的信噪比, 提升相控阵损伤成像方法对损伤定位的准确性。

关键词: Lamb 波; 频散; 线性映射法; 相控阵成像算法; 损伤定位

中图分类号: TU317⁺.8; TB553 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-096

0 引言

工程设施中(如压力容器、航空器等)广泛构建有板壳结构, 在长期运行过程中受外界环境、荷载等作用, 易产生各类损伤, 损伤的累积将导致结构产生故障和功能逐渐丧失^[1,2], 针对板壳结构的损伤评估检测是目前工程技术人员面临的重要挑战。常规超声波^[2-6]检测法多采用体波(bulk waves)检测, 具有穿透力强、检测灵敏度高等诸多优点, 然而其逐点扫描的方式检测效率较低、结果不直观。基于高频超声导波(guide waves)的无损检测方法具有探测距离远, 对被测结构中微小损伤敏感等优势。在诸多基于超声导波损伤检测成像方法^[7-11]中, 超声导波相控阵成像方法应用换能器阵列, 可实现较大范围内损伤的快速扫描成像。然而导波具有多模态及频散特性, 在沿结构传播过程中不同模态的信号相互混叠, 信号信噪比较低^[12-14], 严重制约了超声导波相控阵对损伤成像的精度。

因此, 去除或补偿信号中的频散效应是超声导波运用于相控阵成像方法的关键问题。Alleny 等^[14]在频散效应较弱的频率(操作点)附近选用窄带信号激励超声导波, 然而操作点往往处于低频范围内, 限制了对损伤检测的灵敏度; Wilcox^[15]提出“时间距离域变换法”, 将不同频率分量下的群速度作为频散补偿的加权因子, 从而达到补偿非线性频散关系的效果; 吴斌等^[16]应用时间距离域变换法提取了被频散特性湮没的缺陷信息, 实现了管中缺陷的识别问题, 并通过实验进行了验证; Sicard^[17]提出“后向传播法”, 在频域中补偿导波每一频率分量在传播过程中产生的相位变化, 达到消除频散效应目的。以上方法均需对每一频率分量的数据进行补偿处理, 其效率受限于庞大的运算量^[18]。Liu 和 Yuan^[19]提出“线性映射法”, 将非线性频散关系在中心频率处展开并保留其线性项, 从而达到频散去除的目的, 提高了信号信噪比, 该方法保证了中心频率处信号分量群速度不变, 不仅保留了损伤散射信号的时间特征信息, 也能够快速去除原始信号中的频散效应, 是一种极具潜力的导波信号分析方法。

* 收稿日期: 2017-04-19; 修回日期: 2017-06-20

基金项目: 国家自然科学基金重点国际合作项目(11520101001)资助; 江苏省重点研发计划—产业前瞻与共性关键技术(BE2015138); 镇江市重点研发计划—产业前瞻与共性关键技术(GY2015054)

通讯作者: 骆英(1960—), 男, 博士, 教授。结构健康检测。Email: luoying@mail. ujs. edu. cn

本文拟将线性映射方法与基于超声导波的相控阵损伤成像方法结合,通过数值仿真对板结构中超声导波(也称 Lamb 波)信号进行去除频散处理,并考察去除频散对超声导波相控阵损伤成像效果的提升,最后构建损伤检测实验平台,验证了理论和方法的有效性。

1 基本理论

1.1 线性映射法

在各向同性板中,传至 x 处的 Lamb 波信号经傅里叶变换后可以写成如下形式:

$$f(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int F(\omega) e^{-i(\omega t - kx)} d\omega \quad (1)$$

式中, $F(\omega)$ 是 $f(t)$ 的频域表示形式; k 是波数,不同模态 Lamb 波的频散关系由 $k=K(\omega)$ 确定。线性映射法需要已知待处理信号的频散关系,如图 1 实线所示,可以看出,在 $20\text{kHz} \sim 150\text{kHz}$ 频率范围内,频散曲线非线性较明显,频散较为严重;在 $150\text{kHz} \sim 300\text{kHz}$ 频率范围,频散曲线几乎为直线,频散现象较弱。本文采用中心频率为 50kHz , A_0 模态的 Lamb 波为研究对象,此频段内其频散效应较强。由频谱图(图 2)可知频率在 $0\text{kHz} \sim 100\text{kHz}$ 的范围内包含了信号的主要有效成分,因此在此频率范围内实施频散去除处理,可以验证频散去除的有效性。

将频散关系在中心频率处进行 Taylor 级数展开,并保留一阶线性近似项:

$$K(\omega) \approx K_{lin}(\omega) = k_0 + k_1(\omega - \omega_c) \quad (2)$$

式中, $k_0 = \omega_c/c_p$, $k_1 = dk/d\omega_c$, $1/k_1$ 代表群速度。线性近似后的频散关系(图 1 虚线)在中心频率 50kHz 处和理论频散曲线相切,保证了中心频率处的群速度不变,损伤散射信号的渡越时间信息能够准确提取,为后续相控阵对损伤精确成像打下了基础。

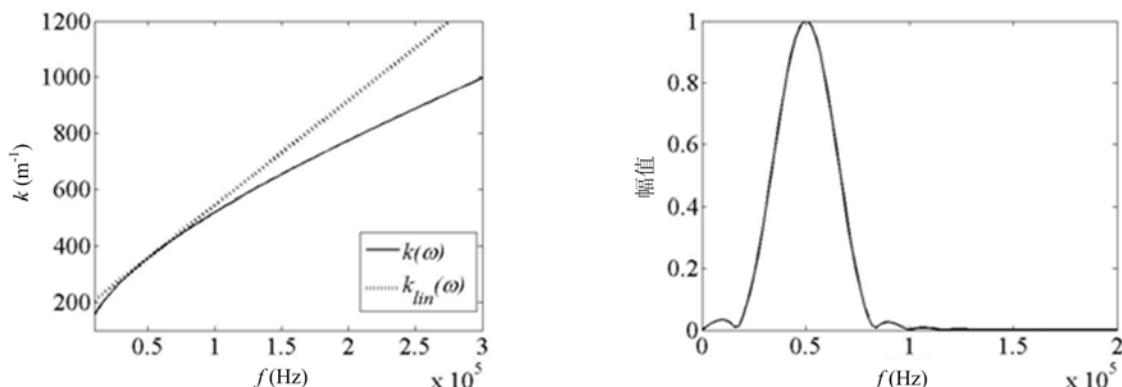


图 1 线性频散关系和理论频散关系

(板厚 1mm, 泊松比为 0.33)

Fig. 1 Linear dispersion relation and theoretical dispersion relation (plate thickness=1mm, Poissonby=0.33)

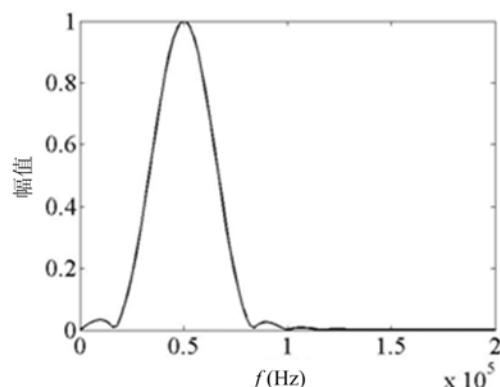


图 2 激励信号的频谱图(50kHz)

Fig. 2 Spectrogram of exciting signal(50kHz)

频散去除步骤如图 3 所示。



图 3 频散去除步骤

Fig. 3 Steps of dispersion removal

由线性映射法去除频散后的信号,可用于相控阵成像算法,能够提升对板壳结构的检测能力,提高相控阵对损伤成像定位的准确性。

1.2 相控阵成像算法

相控阵通过若干个超声换能器单元组成的一维或二维阵列,可以对指定区域进行扫描成像。相控

阵成像方法将成像区域划分成多个不同的小区域。假设位于 $d(x_d, y_d)$ 的像素点是虚拟的损伤散射点源(如图4所示),信号从激励位置 $o(0, 0)$ 经损伤散射再传播至第 $m(x_m, y_m)$ 个阵元,其渡越时间为:

$$t_{adm} = (\sqrt{x_d^2 + y_d^2}/c_g) + t_{dm}$$

式中, c_g 为群速度; t_{dm} 表示从 d 传至第 m 个阵元的时长。以 d 点到 $N(N > 2)$ 个阵元的最短渡越时间(t_{dmin})为基准,每个阵元的相对延时可表示为 $\Delta t_d = t_{dm} - t_{dmin}$ 。

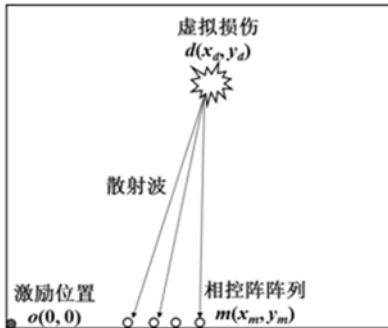


图4 相控阵成像算法示意图

Fig. 4 Phase array imaging diagram

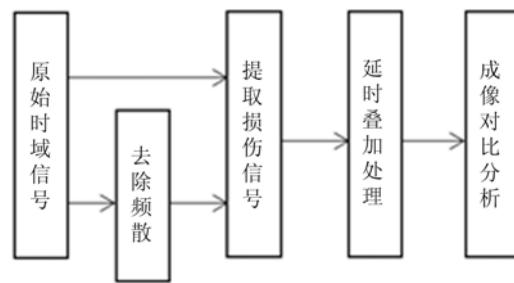


图5 整体算法流程图

Fig. 5 Flow chart of the whole algorithm

设 $s_{dm}(t)$ 为 d 点对第 m 个阵元的散射信号,则 $s_{dm}(t_{adm}(x, y))$ 对应于从 d 位置散射回来的信号幅值,将所有阵元的散射信号进行延时叠加处理得到 d 点的信号幅值 $A_d(x, y)$ 为:

$$A_d(x, y) = \sum_{m=1}^N s_{dm}(t_{adm}(x, y)) \quad (3)$$

将成像区域中每点的 $A_d(x, y)$ 值进行归一化处理,作为成像指标用于损伤的相控阵成像。如果 d 不是损伤点,在 $t_{adm}(x, y)$ 处不会出现损伤散射信号, $A_d(x, y)$ 值较小;如果 d 为真实损伤位置,则在 $t_{adm}(x, y)$ 处会出现损伤散射波包, $A_d(x, y)$ 值较大。所以成像结果中,幅值较大的聚焦点为损伤点。

相控阵损伤成像中引入线性映射法的整体算法流程如图5所示。

2 数值仿真

为考察频散去除对相控阵成像效果的提升,采用 COMSOL 软件建立如图6所示的模型(铝板参数见表1),假设压电片与结构刚性粘结,忽略粘结层的剪切延迟效应,在数值模型中采用等效力线^[20]代替原点处的压电片作为驱动器激励超声 Lamb 波信号(表达式见式(4)),设置对称边界(图中虚线标出),在距离激励源位置 165mm~235mm 处等间隔分布的 8 个采样点(间隔 10mm)提取导波场散射信号。板中(200mm, 300mm)位置预制一直径为 15mm 圆孔损伤,以保证边界反射信号与损伤散射信号显著分离。激励信号如图7所示,中心频率为 50kHz 以 A_0 模态占主导地位的 Lamb 波,群速度 $c_g = 1182.6$ m/s。

$$u(t) = v_{pp} [H(t) - H(t - (N/f_c))] \times (1 - \cos(2\pi f_c t / N) \sin(2\pi f_c t)) \quad (4)$$

式中, $H(t)$ 为 heaviside 阶跃函数; 激励信号幅值 $v_{pp} = 100$; 信号波峰数 $N = 3$ 。

表1 铝板参数

Tab. 1 Parameters of Aluminium plate

材料	杨氏模量 E/GPa	密度 $\rho/(kg/m^3)$	泊松比	长×宽×厚/(mm)
铝	72.4	2780	0.33	1000×1000×1

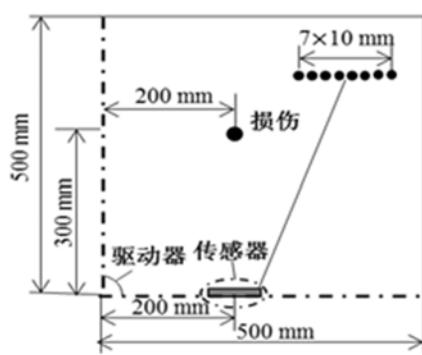


图 6 仿真模型示意图
Fig. 6 Simulation mode sketch

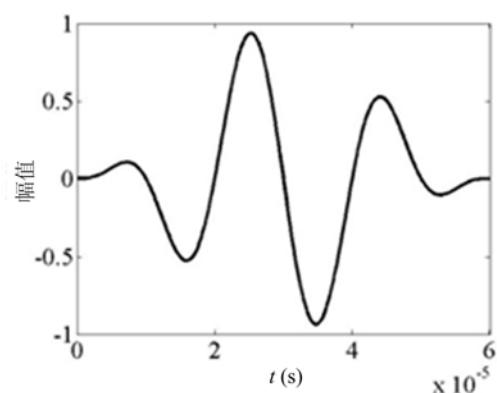


图 7 激励信号
Fig. 7 Excited signal

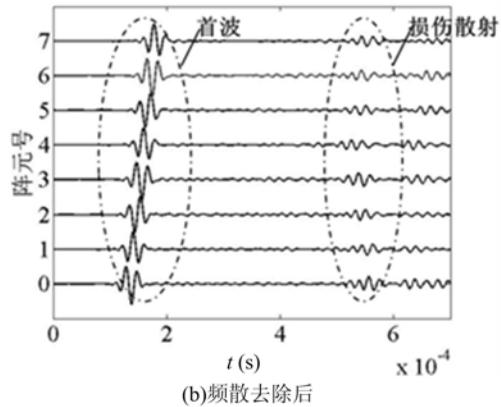
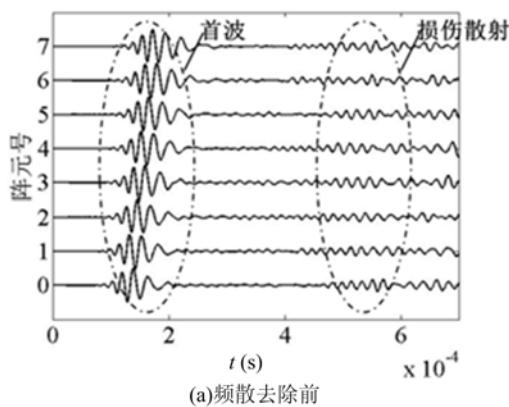


图 8 仿真各阵元接收到的信号

Fig. 8 The received signal of each element in simulation

仿真中各个阵元接收到的信号如图 8 所示。由于受到频散效应的影响, 图 8(a) 中损伤散射信号信噪比低, 真实到达时间难以准确提取。经过线性映射法去除频散后信号, 损伤散射信号信噪比提高(图 8(b))。频散去除前后所提取渡越时间与理论值的比较如图 9 所示, 可见频散去除前损伤散射信号的渡越时间和理论时间相差较大, 而频散去除后损伤散射信号的渡越时间明显更加接近于理论值。

图 10(a) 和图 10(b) 分别为中心频率为 50kHz 时, 频散去除前和频散去除后的相控阵损伤成像图, 图 11(a) 和图 11(b) 分别为中心频率为 150kHz 时, 相控阵损伤成像图, 图中圆圈位置为损伤真实位置。由成像指标获得的损伤中心位置偏离见表 2。可见通过线性映射法去除 Lamb 波频散显著提高了相控阵对损伤定位的准确性和成像效果, 中心频率为 50kHz 时损伤中心位置由去除频散前偏离 15% 提高至 2% 左右, 中心频率为 150kHz 时损伤中心位置偏离由 9% 提高至 1.5% 左右。

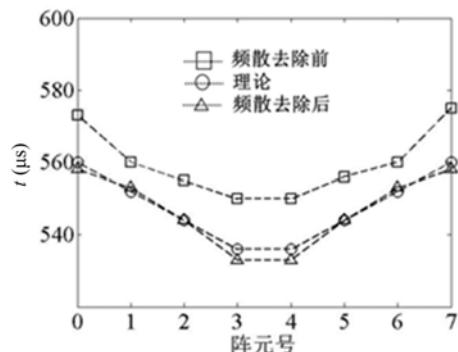


图 9 仿真损伤渡越时长
Fig. 9 The damage time of flight in simulation

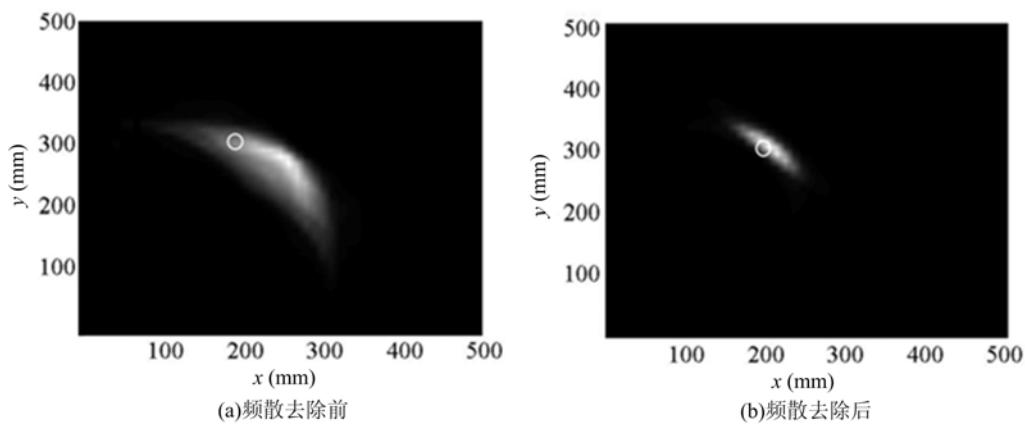


图 10 仿真相控阵成像 (50kHz)

Fig. 10 Phased array imaging in simulation (50kHz)

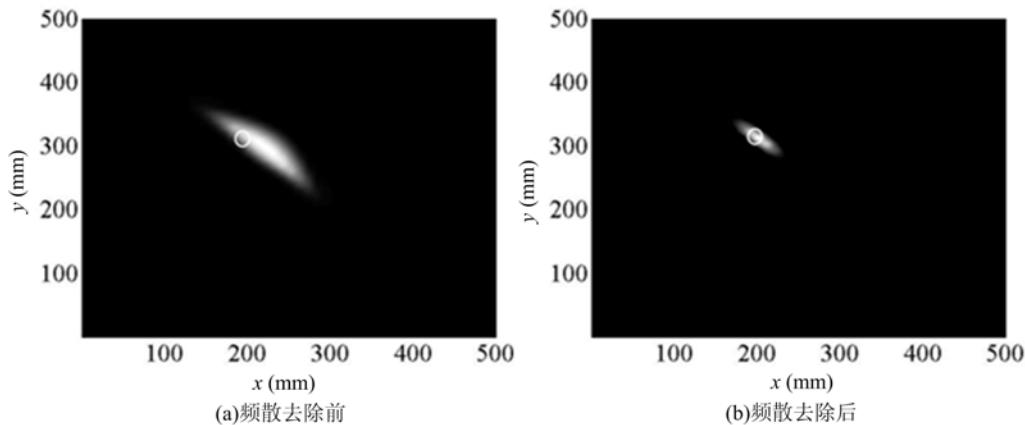


图 11 仿真相控阵成像(150kHz)

Fig. 11 Phased array imaging in simulation(150kHz)

表 2 仿真损伤中心位置偏离

Tab. 2 The deviation of the damage center location in simulation

中心频率(kHz)	50	150
实际损伤中心位置(mm)	(200, 300)	(200, 300)
频散去除前损伤中心位置偏离(mm)	(35, -30)	(26, -17)
频散去除后损伤中心位置偏离(mm)	(6, -4)	(4, -3)

3 实验验证

为了验证仿真结果的有效性,实验中用的铝板参数(详见表 1)、激励信号和阵元布置以及损伤大小的设置和仿真相一致。采用直径为 7mm, 厚为 0.5mm 的单一 P-15 圆形压电片作为驱动器, 8 个和驱动器参数一样的圆形压电片作为传感器, 阵元和损伤位置详见图 12(以驱动器作为原点建立直角坐标系, 损伤中心位置为(200mm, 300mm))。

图 13 为实验中各个阵元的结构响应信号。由图 13(b)可见, 线性映射法去除 Lamb 波频散具有较好的效果, 提高了信号信噪比, 使得损伤的渡越时间信息能够准确提取(见图 14), 频散去除后损伤散射信号的渡越时间更加接近于理论值。

图 15 和图 16 分别为中心频率 50kHz 和 150kHz 时相控阵损伤成像的实验结果。图 15 和图 16 中

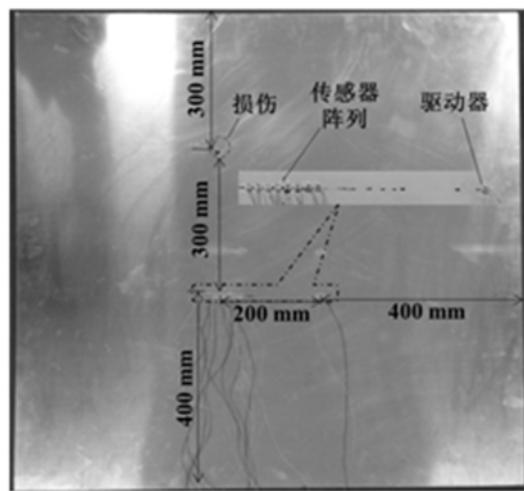


图 12 实验布置图

Fig. 12 Experimental set-up

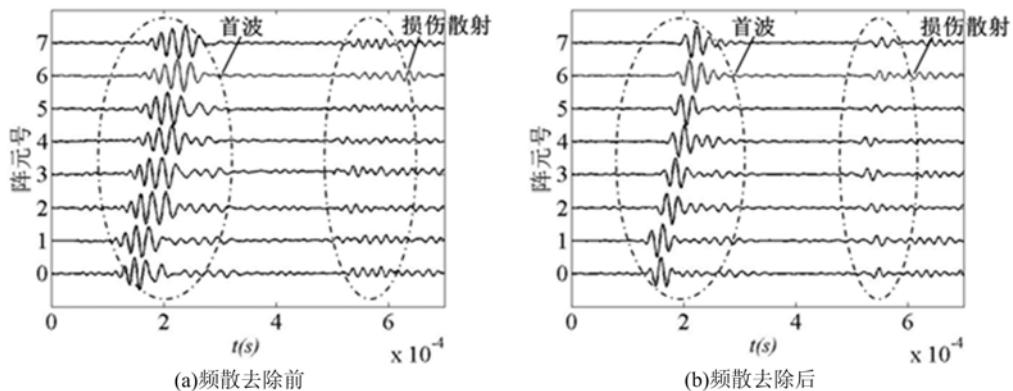


图 13 实验中各个阵元接收到的信号

Fig. 13 The received signal of each element in experiment

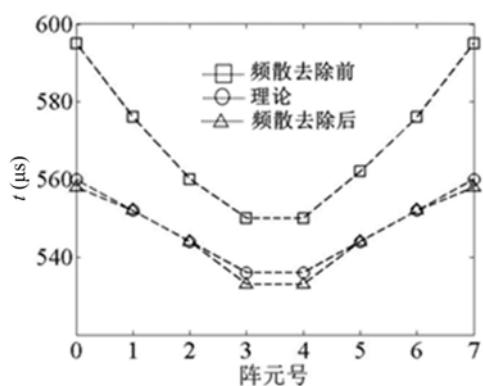


图 14 实验损伤渡越时长

Fig. 14 The damage time of flight in experiment

损伤中心位置的变化(见表 3)表明:去除 Lamb 波频散可以显著提高相控阵损伤成像的准确度,中心频率为 50kHz 时,损伤中心位置由去除频散前偏离 18% 提高至 3% 左右;中心频率为 150kHz 时,损伤中心位置偏离由 10% 提升至 2% 左右。对比实验和仿真结果,两者吻合度较高,表明了线性映射法和相控阵成像法结合可以运用到实际工程损伤检测中。

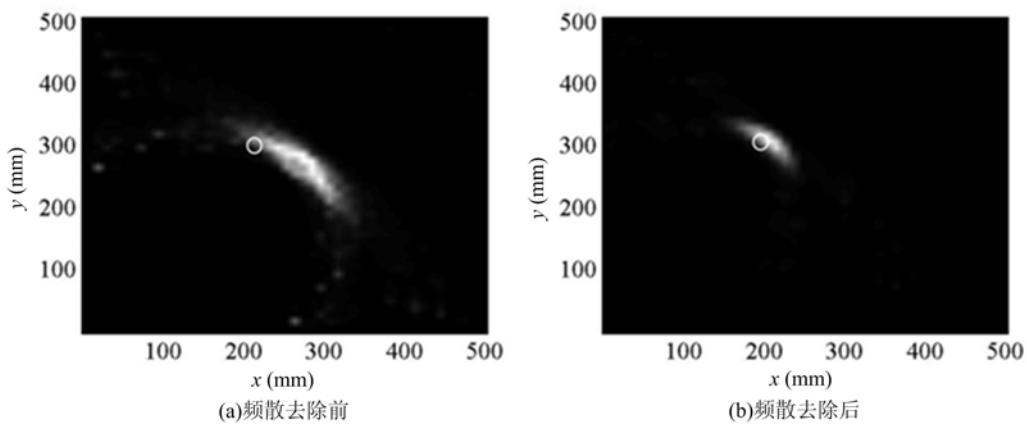


图 15 实验相控阵成像(50kHz)

Fig. 15 Phased array imaging in experiment(50kHz)

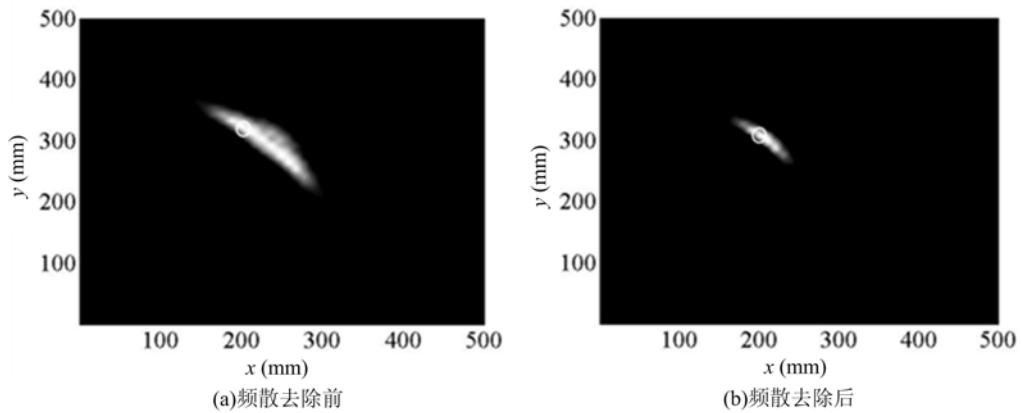


图 16 实验相控阵成像(150kHz)

Fig. 16 Phased array imaging in experiment(150kHz)

表 3 实验损伤中心位置偏离

Tab. 3 The deviation of damage center location in experiment

中心频率(kHz)	50	150
实际损伤中心位置(mm)	(200, 300)	(200, 300)
频散去除前损伤中心位置偏离(mm)	(50, -30)	(28, -17)
频散去除后损伤中心位置偏离(mm)	(7, -5)	(5, -4)

4 结论

超声导波相控阵成像方法受到频散效应的影响,使得含损伤散射信号信噪比较低,渡越时间难以准确提取,影响了损伤的成像精度。针对此挑战,本文引入线性映射法,在保证中心频率处群速度不变的前提下除去了导波的频散效应,提高了信号的信噪比,准确提取了损伤信号的渡越时间信息,从而提高了相控阵成像方法对损伤定位的精度(数值模拟中,当激励信号中心频率为50kHz时所定位损伤中心位置由去除频散前偏离15%提高至2%左右,150kHz时所定位损伤中心位置偏离由9%提升至1.5%左右)。本文结合上述理论研究构建了频散去除和损伤成像算法,并搭建了超声导波相控阵损伤检测平台进行实验验证,实验结果与数值仿真结果相比较,吻合度高(当激励信号中心频率为50kHz时,实验实测所定位损伤中心位置由去除频散前偏离18%提高至3%左右,150kHz时损伤中心位置偏离由10%提高至2%左右)。本文的研究成果有效提升了现有超声导波相控阵方法的成像精度,也可拓展应

用于其他各类基于超声导波的损伤成像方法,为工程实际中板壳结构的损伤精确检测提供了方法和技术基础。

参考文献:

- [1] 詹永祥. 高速铁路无碴轨道桩板结构路基设计理论及试验研究[D]. 西南交通大学, 2007 (ZHAN Yongxiang. Study on design theory and experiment of high speed railway ballastless track pile slab structure subgrade[D]. Southwest Jiaotong University, 2007 (in Chinese))
- [2] 闫文斌. 基于 X-DR 的电力设备结构缺陷检测技术研究[D]. 华北电力大学, 2013 (YAN Wenbin. Research on defect detection of power equipment based on X-DR[D]. North China Electric Power University, 2013 (in Chinese))
- [3] 赵国旗, 虞波, 骆英, 等. 与 CRP 相结合的 SAFT 在混凝土损伤检测成像中的研究[J]. 实验力学, 2015, 30(6):717—722 (ZHAO Guoqi, YU Bo, LUO Ying, et al. On the imaging method in concrete damage detection based on the combination of SAFT with CRP signal superposition method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(6):717—722 (in Chinese))
- [4] 赵国旗, 陈晓君, 骆英, 等. F-K 域内混凝土结构损伤的时间逆转成像算法研究[J]. 建筑技术, 2017, 48(1):92—94 (ZHAO Guoqi, CHEN Xiaojun, LUO Ying, et al. Time reversal imaging method of concrete structure damage in the frequency-wavenumber domain[J]. Building Technology, 2017, 48(1):92—94 (in Chinese))
- [5] Miller D L. Ultrasonic detection of resonant cavitation bubbles in a flow tube by their second-harmonic emissions [J]. Ultrasonics, 1981, 19(5):217—224.
- [6] 骆英, 于长煦, 顾爱军. 应用声发射技术的钢筋与混凝土粘结滑移特性研究[J]. 实验力学, 2011, 26(4):343—349 (LUO Ying, YU Changxu, GU Aijun. Study of the bond-slip behavior between rebar and concrete based on acoustic emission technology[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(4):343—349 (in Chinese))
- [7] 王自平. 用于结构损伤检测的 OPFC 超声相控阵驱动理论及技术研究[D]. 江苏大学, 2014 (WANG Ziping. Research on theory and technology of OPFC ultrasonic phased array linear drive for structural damage detection [D]. Jiangsu University, 2014 (in Chinese))
- [8] Rajagopalan J, Balasubramaniam K, Krishnamurthy C V. A single transmitter multi-recievers(STMR)PZT array for guided ultrasonic wave based structural health monitoring of large isotropic plate structures[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(5):1190—1196.
- [9] 高鹏, 李法新. 非线性超声相控阵无损检测系统及实验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(1):1—11 (GAO Peng, LI Faxin. Nonlinear ultrasonic phased array nondestructive testing: system and performance study[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(1):1—11 (in Chinese))
- [10] Zhao X L, Gao H D, Zhang G F, et al. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring [J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(4):1208—1217.
- [11] Wang Q, Yuan S F, Chen X H, et al. Active Lamb wave synthetic wave front damage imaging monitoring method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(11):2468—2474.
- [12] Rose J L. Ultrasonic guided waves in solid media[M]. Cambridge University Press, 2014.
- [13] 刘增华, 曹丽华, 何存富, 等. 铝板中激光 Lamb 波信号的模态分析与缺陷检测研究[J]. 实验力学, 2016, 31(4):425—430 (LIU Zenghua, CAO Lihua, HE Cunfu, et al. On the mode identification and defect detection of laser-induced Lamb waves signal in an aluminum plate[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(4):425—430 (in Chinese))
- [14] Alleny D N, Cawley P. Optimization of Lamb wave inspection techniques[J]. NDT&E International, 1992, 25(1):11—22.
- [15] Wilcox P D. A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50(4):419—427.
- [16] 吴斌, 邓菲, 何存富, 等. 频散补偿在导波缺陷形状辨识上的应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(3):2095—2097 (WU Bin, DENG Fei, HE Cunfu, et al. Application of dispersion compensation in guided wave defect identification[J]. Journal of Instrumentation, 2006, 27(3):2095—2097 (in Chinese))

- [17] Sicard R, Goyette J. A numerical dispersion compensation technique for time recompression of Lamb wave signals [J]. Ultrasonics, 2002, 40(1-8):727–732.
- [18] 蔡建. Lamb波损伤成像中的频散补偿方法研究[D]. 南京航空航天大学, 2012 (CAI Jian. Study on dispersion compensation in Lamb wave damage imaging[D]. Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012 (in Chinese))
- [19] Liu L, Yuan F G. A linear mapping technique for dispersion removal of Lamb waves[J]. Structural Health Monitoring, 2010, 9(1):75–86.
- [20] Giurgiutiu V. Structural health monitoring: with piezoelectric wafer active sensors[M]. Academic Press, 2007.

On the linear mapping method for removing frequency dispersion of Lamb wave

LUO Ying, XU Cai-jun, XU Chen-guang, XU Gui-dong, YANG Guo-ying, WANG Zi-ping

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, International Joint Research Center for Health Management on Key Structure of the High-End Equipment, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Lamb wave is often used in plate and shell structure non-destructive examination (NDE). However, the frequency dispersion effect of Lamb wave can cause the reflected signal transit time information from the damage in plate can not be accurately extracted, thus affecting the damage locating and imaging accuracy. In this paper, introducing linear mapping method, the original nonlinear frequency dispersion relation is replaced by linear frequency wave number relation, thus the frequency dispersion effect near the excitation centre is removed. The effect of frequency dispersion removal is analyzed by numerical simulation and experimental method respectively, and then the imaging accuracy of damage in metal plate is studied by phased array imaging algorithm. Results show that using linear mapping method to remove frequency dispersion can remarkably improve the signal to noise ratio of damage scattering signals, and promote damage locating accuracy of phased array damage imaging method.

Keywords: Lamb wave; frequency dispersion; linear mapping method; phased array imaging algorithm; damage location