

基于压电超声相控阵方法的结构多损伤监测*

王志凌^{1,2}, 袁慎芳¹, 邱雷¹, 钟永腾¹

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

(2. 南京航空航天大学金城学院 南京, 211156)

摘要 基于超声相控阵的主动结构健康监测是飞行器结构健康监测领域一个新的发展方向,也是当前研究的难点之一,超声相控阵结构健康监测在国内还处于起步阶段。在已有应用超声相控阵技术对单损伤定位的基础上,进一步研究飞行器结构中多损伤的监测。通过控制信号的延时,进而控制波束指向,实现对结构的多方位、多损伤扫描。在铝板上进行了实验研究,通过对比不同角度延时前后的损伤散射信号及其合成信号,验证了超声相控阵对多损伤信号的延时叠加能够有效地提高多损伤信号的能量,同时减少非损伤处的能量,从而增强了信号的信噪比,并且对多损伤识别具有较高精度。

关键词 Lamb 波; 超声相控阵; 线阵换能器; 单模式; 多损伤

中图分类号 TB553

引 言

随着当前对飞行器健康监测与管理的日益关注,结构健康监测研究越来越受到人们的重视。主动 Lamb 波监测及成像技术是结构健康监测研究的热点之一,而基于超声相控阵的主动结构健康监测,也逐渐被人们所重视和研究,成为结构健康监测领域新的发展方向^[1]。

超声相控阵结构健康监测技术是利用超声相控阵换能器对结构进行电子扫描的一种技术。用电子的方法控制换能器中每个压电元件的发射和接收的时间延迟,进而控制波束的方向,可以很方便地实现对结构的多方位扫描或是特定区域的扫描,而且由于各波束在聚焦点处相干叠加,能够使监测信号的信噪比得到显著的提高。

近年来,国内外许多学者对于超声相控阵技术的应用做了大量研究并取得了相当成果。Giurgiutiu 等^[2-3]分析研究了各向同性板中 Lamb 波的解析建模,得到了一定条件下的 Lamb 波传播幅频特性,并在铝板结构中对裂纹损伤和孔洞损伤进行了研究和实验验证。Malinowski 等^[4]对 Lamb 波进行了研究,并在一维线阵铝板中进行了裂纹损伤的实验验证,还提出了改进的阵列形式。Wilcox

等^[5-7]研究 Lamb 波传播特性,并对圆形超声相控阵进行了一定的研究。国内,施克仁等^[8-9]对相控阵超声声场、阵列探头设计、超声相控发射延时等方面进行了研究。南京航空航天大学袁慎芳等^[10-11]在航空结构中研究了超声相控阵技术及其成像技术,对铝板和复合材料板中的单个损伤有较高的测量精度。其他一些科研院校,如上海交通大学、哈尔滨工业大学、天津大学和华中北大学等,都在超声相控阵检测方面进行了理论和实验方面的研究。但国内的大部分研究局限于相控阵超声声场理论的研究和在无损检测中的应用,在飞行器板材结构中应用的较少。

笔者在已有应用超声相控阵技术对单损伤定位的基础上,进一步研究飞行器结构中多损伤的监测。通过具体实验,分析多损伤的散射信号及其合成信号,进一步验证了超声相控阵技术在多损伤监测中的应用,且得到了较高的测量精度。

1 超声相控阵技术

1.1 基本原理

超声相控阵换能器的设计基于惠更斯原理,换能器由多个相互独立的压电晶片组成阵列,每个晶片称为一个阵元,文中采用多个阵元组成的一维阵

* 国家杰出青年基金资助项目(51225502);国家自然科学基金资助项目(51205189)
收稿日期:2013-04-13;修回日期:2013-06-28

列。通过电子系统控制换能器阵列中的各个阵元,按一定的规则和时序激发,使阵列中各阵元发射的超声波叠加形成一个新的波阵面。这相当于改变了换能器的空间排列形式,从而改变换能器阵列所辐射的波束指向。同样,在反射波的接收过程中,按一定规则和时序控制接收单元接收并进行信号合成,再将合成结果以适当形式显示。

如图1超声相控阵扫描原理图中, xOy 平面内 M 个压电元件沿 x 轴等间距均匀排列成一个线阵,各压电元件之间的间距为 d , $d/\lambda \leq (N-1)/2N$ (λ 为超声波长),抑制波束的栅瓣^[2]。点 $P(\rho, \theta)$ 为监测远场区任意一点, ρ 为 P 点到原点的距离, θ 为 P 点对应的波束指向(P 点与 x 轴夹角)。以压电阵列的中心位置为原点建立坐标系,则第 i 号压电元件的坐标为 $(x_i, 0)$, $i=0 \sim M-1$, $x_i = [i - (M-1)/2]d$ 。

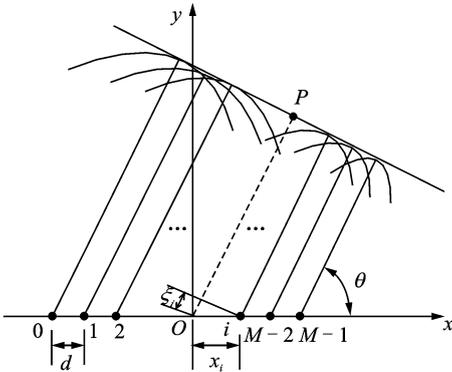


图1 超声相控阵原理

Fig.1 Principle of phased array

阵元发射信号时,远场区 $P(\rho, \theta)$ 点接收到的信号为各个激励信号在板中传播一定距离后信号的累加,那么点 P 接收到的信号为

$$S_P(\rho, \theta) = K_1 \sum_{i=0}^{M-1} S_e \left[t - \frac{\rho}{c} + \delta_i(\theta) \right] \quad (1)$$

其中: K_1 为发射过程中信号传播一定距离后幅值的衰减系数; $S_e(t)$ 为激励信号; ρ/c 为信号从坐标原点传播到 P 点所需要的时间; c 为超声波在板中的传播速度; $\delta_i(\theta)$ 为第 i 个压电元件相对于坐标原点到达 P 点的时间差,其中, $\delta_i(\theta) = x_i \cos \theta / c$, $i=0 \sim M-1$,该时间差是由第 i 个压电元件相对于坐标原点到达 P 点的波程差 $\xi_i(\theta) = x_i \cos \theta$ 所引起的。

为使各阵元产生的激励信号同时到达 P 点,实现相控聚焦,则对每个阵元激励附加 $\Delta t_i(\theta)$ 的时间延迟,则 P 点接收到的信号为

$$S_P(\rho, \theta) = K \sum_{i=0}^{M-1} S_e \left[t - \frac{\rho}{c} + \delta_i(\theta) - \Delta t_i(\theta) \right] \quad (2)$$

如果时间延迟 $\Delta t_i(\theta)$ 与时间差 $\delta_i(\theta)$ 相等,即 $\Delta t_i(\theta) = \delta_i(\theta) = x_i \cos \theta / c$, $i=0 \sim M-1$,那么 $P(r, \theta)$ 点接收到的信号能量达到最大,即此时波束的最大值指向为 θ , P 点信号为

$$S_P(t) = K_1 M S_e \left[t - \frac{\rho}{c} \right] \quad (3)$$

当时间延迟 $\Delta t_i(\theta) = x_i \cos \theta / c$,波束指向由阵列方向旋转到与 x 轴成 θ 方向,即通过控制时间延迟,就可以按照预定的偏转角度控制波束主瓣偏转方向。由互易性,在相同条件下,接收和发射是一致的,即通过控制时间延迟可以接收预定的偏转角度方向上的目标信息。若在 P 点处无损伤,超声波将继续向前传播;若在 P 点处有真实损伤存在,由于经过时间延迟,各个晶片激发的超声波在 P 点具有相同的相位,其叠加的能量最强,会形成较大的反射回波。接收过程和发射过程一致,对各个晶片接收的回波信号同样经过延时叠加,合成最终的幅值最大的回波信号。

1.2 定位原理

信号波束在监测角度范围内进行扫描时,利用接收到的回波信号幅值进行角度测量。若信号的波束指向偏转到损伤位置所在的方向,所有信号将在损伤处聚焦,则合成的信号能量增强,从而在此方向上由损伤反射的信号能量也最大,根据这个原理就可以获得损伤的角度信息。

通过上述获得的损伤信号的角度信息,再加上该方向上合成信号相对于激励信号的波达时间差 t ,就可以确定出损伤所在位置的极径 ρ (坐标原点到损伤的距离)

$$\rho = \frac{ct}{2} \quad (4)$$

其中: c 为结构中Lamb波的波速。

根据相控阵在监测角度扫描损伤的方向和由式(4)计算损伤到坐标原点的距离,可以得到损伤的具体平面几何位置。将各方向延迟后的传感信号进行叠加,得到其对应方向的波束。因为信号的能量(幅值)是距离(时间)和方向(角度)的函数,那么把不同方向上合成信号的能量用灰度的形式表示在距离和角度的平面上,即可得到扫描图像。图像中灰度的从暗到亮对应着能量从低到高,因此扫描图像可以

清晰地表征出损伤。

2 超声相控阵方法实验验证

2.1 实验系统

实验系统为南京航空航天大学实验室自主研发的压电多通道结构健康监测扫查系统^[12],图2为实验系统整体实物图。该系统支持24路激励和传感通道的快速切换,可以将激励信号加载到激励元件上,并对传感信号进行信号调理和采集。

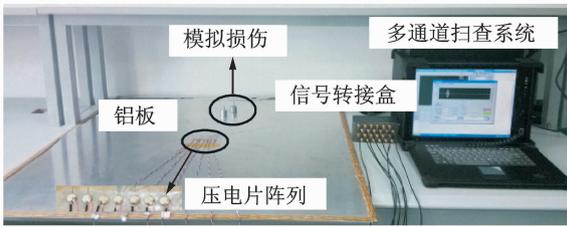


图2 实验系统
Fig.2 Experimental setup

被测结构选用飞行器结构中常见的LY-12铝板(1 000 mm×1 000 mm×2 mm),在其表面布置有7个压电片0~6号组成的一维线型压电片阵列,压电元件采用PZT-5型压电片,其直径为Φ8 mm,厚度为0.48 mm,相邻两个压电片的中心间距为12 mm,7个压电片的标号从左到右依次为0~6号,以压电阵列中心位置为原点,所在直线为横轴,压电元件标号由小到大的方向为正方向,建立坐标系。以Φ20 mm,重为2 kg质量块加载模拟损伤,铝板中压电片和损伤的位置为图3所示。利用质量块加载形式模拟损伤是因为:质量块与铝板的相连部分的界面会对Lamb波传播产生散射作用,这与

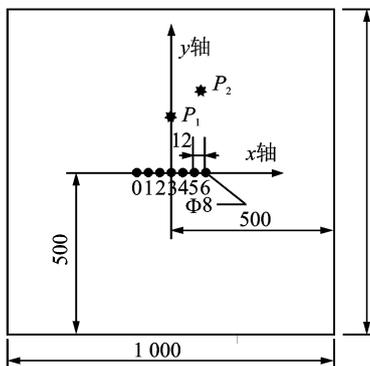


图3 压电片和损伤的位置(单位:mm)

Fig.3 Position of the piezoelectric and damages (unit: mm)

真实损伤引起的Lamb波散射相同,且模拟损伤可以在保证实验有效性的前提下节约实验试件。

2.2 实验结果与分析

驱动器激励的监测信号为窄带5波峰调制正弦信号,幅值为±5 V,其中心频率为40 kHz。本实验之所以选择激励信号为40 kHz,是因为在这个频率下压电片的响应信号中主要存在A₀模式,S₀模式波包幅值较小,可以忽略。利用单一模态来完成损伤监测,这样就抑制了Lamb波的多模式现象,有利于信号分析。采样频率为2 MHz,采集了1 500个点,图4为激励信号的时域图。

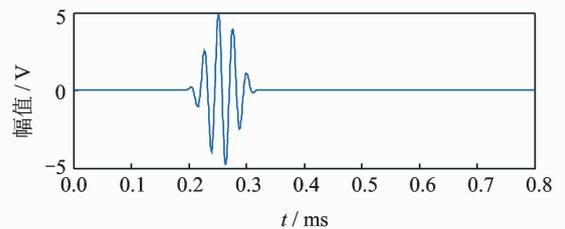


图4 激励信号
Fig.4 Excitation signal

根据相控阵原理,采用改进的数据采集方式,扫查(0~180°)范围内任意一个角度,7个压电元件之间采用轮循方式分别在健康状态和损伤状态下进行数据采集。当其中一个压电元件作为驱动器时,其他6个压电元件则作为传感器接收结构的响应信号,这样对应该角度可以采集7×6=42个传感信号。这些传感信号再按照激励元件的标号、传感元件的标号和波束指向角度计算的延时公式,进行总体延时并叠加,达到信号聚焦、叠加从而放大的效果。这种采集方式和相控阵数据采集方式本质相同,且使采集时间大大缩短,有效提高了工作效率。以下实验均采用改进的数据采集方式。

利用超声相控阵技术对多损伤进行识别,以实际损伤点位置为(200 mm,90°)和(300 mm,80°)为例。以健康状态下采集的传感信号为基准,将损伤状态的传感信号与之相比较,得到各传感器的损伤散射信号。

如图5所示,0号压电元件作为驱动器,5号压电元件作为传感器时,结构健康状态和损伤状态下采集的传感器响应信号与由其计算得到的损伤散射信号。图5(a),(b)为结构损伤前后的响应信号,两组信号相减为图5(c)所示的损伤散射信号。从图5(c)可以看出,损伤散射信号中前面与激励信号相同

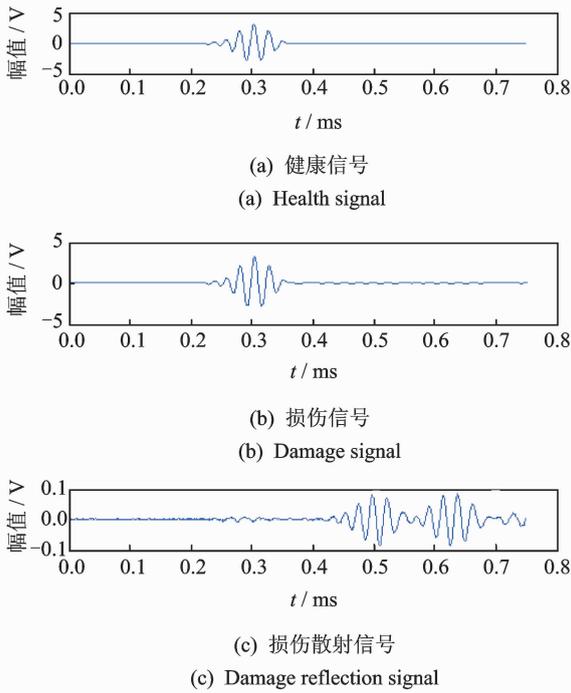


图 5 传感器响应信号与损伤散射信号

Fig. 5 The sensor response signal and the damage reflection signal

位置的是实验仪器产生的串扰,后面有两个明显由

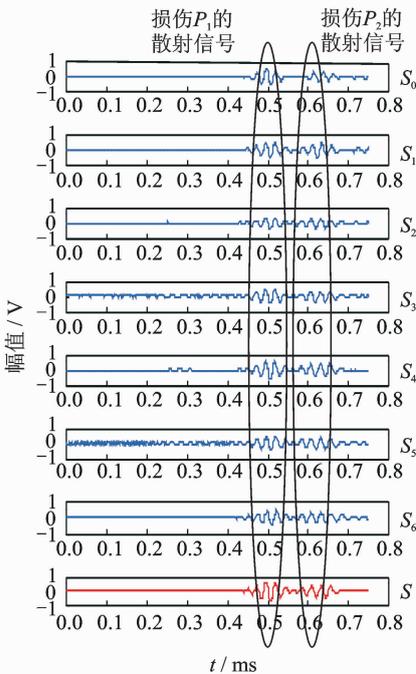


图 6 90°方向上各组延时后损伤散射信号及其合成信号

Fig. 6 The damage reflection signal and the synthesized signal after the delay of each group in the direction of 90 degree

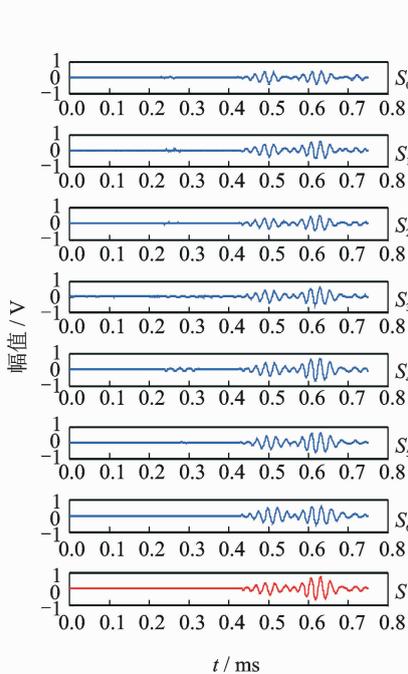


图 7 80°方向上各组延时后损伤散射信号及其合成信号

Fig. 7 The damage reflection signal and the synthesized signal after the delay of each group in the direction of 80 degree

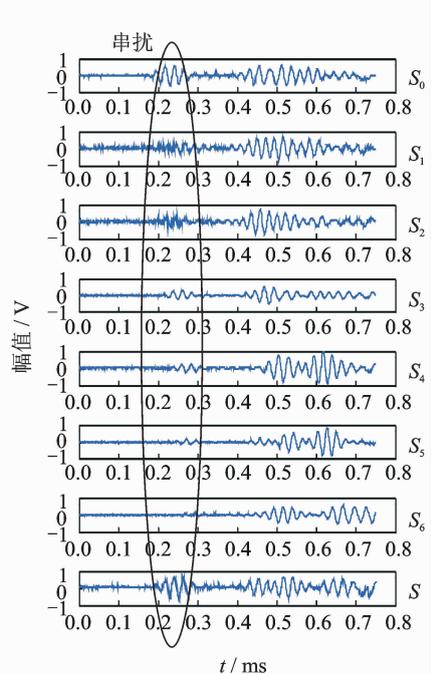


图 8 30°方向上各组延时后损伤散射信号及其合成信号

Fig. 8 The damage reflection signal and the synthesized signal after the delay of each group in the direction of 30 degree

损伤反射信号形成的波包。

通过具体对比分析 90, 80, 30°方向上的各组损伤散射信号及其合成信号,来验证超声相控阵技术对多损伤的识别情况。

图 6 为 90°方向上,延时后的各组损伤散射信号 $S_0 \sim S_6$ 。如式(5)所示, S_i 为 i 号压电片激励,其他各压电片接收的延时后的损伤散射信号 C_{ij} (j 为传感压电片的编号)的合成信号。对比 S_0 和图 5(c) 的损伤散射信号 C_{05} 可以看出,1~6 号压电片接收延时后的损伤散射信号的合成信号 S_0 远大于单个接收的损伤散射信号 C_{05} 。各组损伤散射信号之和 S 如式(6)所示。图 7 为 80°方向上延时后的各组损伤散射信号 ($S_0 \sim S_6$) 和 各组损伤散射信号之和 S 。图 8 为任意选取的 30°方向上延时后的各组损伤散射信号 ($S_0 \sim S_6$) 和 各组损伤散射信号之和 S 。

$$S_i = \sum_{j=0, j \neq i}^6 C_{ij} \quad (i=0, 1, \dots, 6) \quad (5)$$

$$S = \sum_{i=0}^6 S_i \quad (6)$$

从图 6,7 中能够清晰地看到,各组损伤散射信号有两个波包,且各组损伤散射信号的合成信号幅值大大增强。这说明两个波包对应的是两处损伤,

位置距离中心位置是一前一后,与实际两处损伤相符。图6在 90° 方向上信号S中,第1个波包的幅值大于第2个。图7在 80° 方向上信号S中,第2个波包的幅值大于第1个,说明 90° 损伤位置比 80° 损伤位置近,与实际相符。

图8与图6,7比较发现,在非损伤位置对应的角度,各组损伤散射信号延时后相位不相同,和信号S反而是衰减的,几乎与实验仪器的各组损伤散射信号中的串扰信号叠加幅值相当,符合超声相控阵的原理。

图9为损伤位置结构示意图,实际损伤点位置为 $P_1(200\text{ mm}, 90^\circ)$ 和 $P_2(300\text{ mm}, 80^\circ)$ 。图10为损伤识别,监测损伤中心位置为 $(199.6\text{ mm}, 90^\circ)$ 和 $(295.8\text{ mm}, 78^\circ)$ 。与实际损伤点 $(200\text{ mm}, 90^\circ)$ 和 $(300\text{ mm}, 80^\circ)$ 相比,角度误差分别为 0 和 2° ,两点几何距离为 4 和 11 mm ,两个损伤均被很好地识别出来。

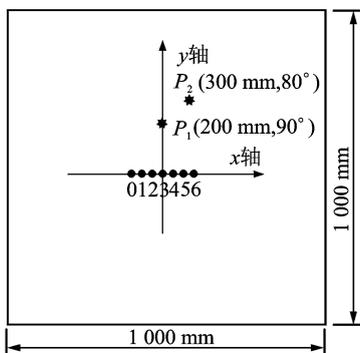


图9 损伤位置结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the damage location

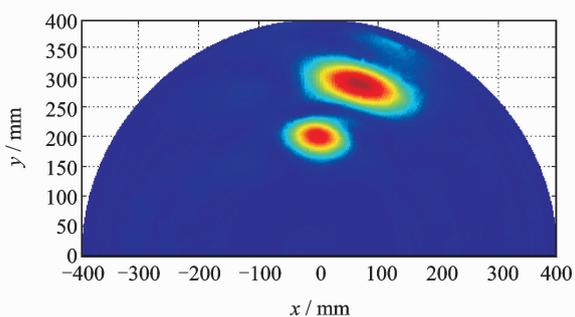


图10 损伤识别图

Fig. 10 Damage identification figure

同理,图11为实际损伤点极坐标 $P_1(245\text{ mm}, 100^\circ)$ 和 $P_2(310\text{ mm}, 100^\circ)$ 位置的结构示意图。图12为实际损伤识别图,实际监测损伤中心位置为 $(303.5\text{ mm}, 102^\circ)$ 和 $(241.5\text{ mm}, 103^\circ)$ 。角度误差分别为 2° 和 3° ,两点几何距离为 12.5 和 13 mm ,可见同一方向上的两个损伤也能被很好地识别出来。

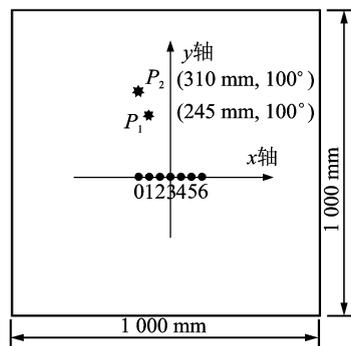


图11 损伤位置结构示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the damage location

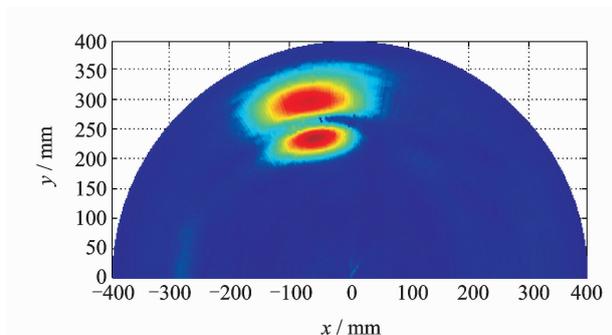


图12 损伤识别图

Fig. 12 Damage identification figure

表1列举了3组多损伤实验的定位结果,其中最后一组为3个损伤的监测,从监测结果中可以看出定位精度较高,距离 ρ 误差均不超过 2.1 cm ,波达方向 θ 误差均不超过 4° 。

表1 多损伤测量结果统计表

Tab. 1 More damage measurement results tables

实际损伤位置	监测损伤位置	角度误差/ $^\circ$	距离误差/cm
$300\text{ mm}, 80^\circ$	$298\text{ mm}, 78^\circ$	2	1
$300\text{ mm}, 105^\circ$	$303\text{ mm}, 109^\circ$	4	2
$200\text{ mm}, 98^\circ$	$206\text{ mm}, 100^\circ$	2	0.9
$250\text{ mm}, 85^\circ$	$254\text{ mm}, 82^\circ$	3	1.4
$300\text{ mm}, 105^\circ$	$306\text{ mm}, 109^\circ$	4	2.1
$200\text{ mm}, 90^\circ$	$203.4\text{ mm}, 92^\circ$	2	0.78
$300\text{ mm}, 80^\circ$	$293.8\text{ mm}, 79^\circ$	1	0.8

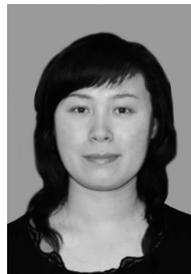
3 结束语

笔者搭建了线阵超声相控阵监测系统,对铝板结构中的多角度、多个损伤进行了监测及成像,通过分析比较阵元延时后损伤信号的合成信号与未延时前单个接收信号。可以看出,延时叠加后的信号能量在损伤位置得到明显的增强,提高了信噪比;同时验证了在无损伤位置的信号延时叠加后的信号反而

有所减弱,从而能够有效地识别出结构中的损伤,且识别精度较高。由于一维线阵本身的局限性^[2],下一步工作将研究二维面阵超声相控阵系统对损伤的监测。

参 考 文 献

- [1] 袁慎芳. 结构健康监控[M]. 北京:国防工业出版社, 2007:206-212.
- [2] Giurgiutiu V. Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors[M]. [S. l.]: Academic Press Inc, 2007:507-552.
- [3] Yu Lingyu, Giurgiutiu V, Design, implementation, and comparison of guided wave phased arrays using embedded piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring[J]. Smart Structures and Integrated Systems, 2006, 6173(61731M):1-12.
- [4] Malinowski P, Wandowski T, Trendafilova I, et al. A Phased Array-based Method for Damage Detection and Localization in Thin Plates[J]. Structural Health Monitoring, 2009, 8(1): 5-15.
- [5] Wilcox P D. Omni-directional guided wave transducer arrays for the rapid inspection of large areas of plate structures[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency, 2003, 50(6): 699-709.
- [6] Fromme P, Wilcox P D, Lowe M J S, et al. On the Development and Testing of a Guided Ultrasonic Wave Array for Structural Integrity Monitoring[J]. IEEE Institute of Electrical and Electronics, 2006, 53(4): 777-785.
- [7] Holmes C, Drinkwater W, Wilcox D. Advanced post-processing for scanned ultrasonic arrays; Application to defect detection and classification in non-destructive evaluation[J]. Ultrasonics, 2008, 48(6-7):636-642.
- [8] 鲍晓宇. 相控阵超声检测系统及其关键技术的研究[D]. 北京:清华大学,2003.
- [9] 施克仁. 无损检测新技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2007:135-138,223-228.
- [10] 孙亚杰, 袁慎芳, 蔡建. 基于超声相控阵的材料结构健康监测实验研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(4):1393-1396.
Sun Yajie, Yuan Shenfang, Cai Jian. Using phased array technology in structure health monitoring[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(4):1393-1396. (in Chinese)
- [11] 孙亚杰, 袁慎芳, 邱雷, 等. 基于 Lamb 波相控阵和图像增强方法的损伤监测[J]. 航空学报, 2009, 30(7): 1325-1330.
Sun Yajie, Yuan Shenfang, Qiu Lei, et al. Structural health monitoring based on lamb wave phased array and image enhancement[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(7): 1325-1330. (in Chinese)
- [12] Qiu Lei, Yuan Shenfang. On development of a multi-channel PZT array scanning system and its evaluating application on UAV wing box[J]. Sensors and Actuators A, Physical, 2009, 151(2):220-230.
- [13] 胥保春, 袁慎芳, 邱雷. Lamb 波与瞬时相位技术在损伤识别中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(3): 240-244.
Xu Baochun, Yuan Shenfang, Qiu Lei. Damage detection based on technology of lamb wave and instantaneous phase[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(3):240-244. (in Chinese)
- [14] Malinowski P, Wandowski T, Trendafilova I, et al. A Phased Array-based Method for Damage Detection and Localization in Thin Plates[J]. Structural Health Monitoring, 2009, 8(1):5-15.
- [15] 张海燕, 于建波, 孙修立, 等. HHT 在 Lamb 波检测信号分析中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(3):223-226.
Zhang Haiyan, Yu Jianbo, Sun Xiuli, et al. Analysis of lamb wave signal using hilbert-huang transform J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(3):223-226. (in Chinese)
- [16] Ostachowicz W, Wandowski T, Malinowski P. Combined distributed and concentrated transducer network for failure indication[C]// Conference on Health Monitoring of Structural and Biological Systems. San Diego, CA, USA:[s. n.], 2010, 3: 8-11.
- [17] Yoo B, Pines D. Piezoceramic-Based 2-D Spiral Phased Array for Damage Detection of Thin Orthotropic Composite Laminates[C]// The 8th International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford, CA, USA:[s. n.], 2011, 7:19-21.



第一作者简介:王志凌,女,1979年2月生,博士研究生、讲师。主要研究方向为结构健康监测,信号信息处理技术。曾发表《针对工件尺寸测量的现场标定技术》《传感技术学报》2006年第19卷第1期)等论文。

E-mail:wangzhiling2013@nuaa.edu.cn

通信作者简介:袁慎芳,女,1968年4月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构健康监测、先进智能传感技术、无线传感器网络和信号信息处理技术。

E-mail:ysf@nuaa.edu.cn

