

文章编号:1004-9037(2014)06-1023-07

无方向数据采集的相控阵结构健康监测研究

孙亚杰¹ 张永宏² 季 赛¹

(1. 南京信息工程大学计算机与软件学院, 南京, 210044; 2. 南京信息工程大学信息与控制学院, 南京, 210044)

摘要: 超声相控阵结构健康监测过程中由于按角度扫描的数据采集持续时间长, 结构损伤前后采集的数据易受环境和结构变化的影响, 针对这一问题, 提出无方向数据采集的相控阵结构健康监测成像定位方法。基于相控阵方法, 对采集后数据根据发射和接收过程进行时间延迟的计算, 然后将监测结果进行二维成像。该方法在玻璃纤维复合材料板结构上的实验研究证明, 采用无方向数据采集的相控阵结构健康监测方法能够精确监测结构中损伤并对损伤进行清晰成像; 并且该方法可以大大缩短监测时间, 从而使监测过程不受环境条件变化的影响, 为超声相控阵监测方法的工程化奠定基础。

关键词: 结构健康监测; 相控阵; 无方向; 复合材料

中图分类号: TB553

文献标志码: A

Non-Directional Data Acquisition for Phased Array Based Structural Health Monitoring

Sun Yajie¹, Zhang Yonghong², Ji Sai¹

(1. School of Computer and Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, 210044, China;

2. School of Information and Control, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, 210044, China)

Abstract: Data acquisition for phased array based structural health monitoring is conducted according to direction in the certain scanning rang of the structure, which affects data acquisition easily by some external factors, such as, environment and the change of the environment and structure. Therefore, the non direction data acquisition for phased array damage identification imaging method is proposed. The same excitation signal is used for all sensors to generate the signals travelling in the structure. The health signals and the damage signals are obtained by the data acquisition method. The damage scattered signals are obtained by comparing the damage signals with the health signals. Based on the phased array theory, the time delay is added to the scattered signals in the signals emission process and the receiving process according to the direction and the sensors. The processed signals are drawn on 2-D mapped image. Experiment on the composite structure shows that the damage in the structure can be well recognized. The method utilizes non direction data acquisition. It can greatly shorten monitoring time and is not affected by the change of environment and structure.

Key words: structural health monitoring (SHM); phased array; no direction; composite material

引 言

健康监测系统能准确地 在结构损伤发生的初

期, 将其发现并能够定位及确定损伤的程度, 进而提供结构的安全性评估^[1-7]。结构健康监测系统是在结构材料上以特定方法融合进传感器、驱动器及部分信号信息处理元件, 同时结合外部计算机数据

采集系统等实现的一种智能系统。超声相控阵监测成像技术是结构健康监测领域新的发展方向,超声相控阵结构健康监测技术是利用超声相控阵驱动器/传感器,通过分析结构传感器响应信号,提取损伤信号,对结构进行扫描的一种技术^[8-14]。由于目前超声相控阵监测方法中数据采集方式采用按方向进行,该方法采集数据量大,使得采集时间长,在采集过程中,温度等环境因素可能会发生变化,采集的数据中携带环境因素的变化,损伤散射信号很容易淹没在结构和外部条件变化引起的信号变化和噪声中,从而很难准确监测结构中的损伤,使监测误差增大;这样不能满足工程应用中实时监测的要求。本文提出无方向的数据采集方式克服按方向数据采集的弊端,提高相控阵结构健康监测的实时性与实用性。

1 基于相控的按方向扫描数据采集方法

相控阵列由多个相互独立的压电传感器在空间按一定方式排列组成一个阵列,每个压电传感器为一个阵元,按一定的规则和时序控制激发各个阵元,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阵元的接收并进行信号合成,再将合成结果以适当形式显示。因此,相控阵是通过控制每个压电阵元的发射和接收的时间延迟进而控制波束的方向,实现对结构的多方位扫描^[15-16]。

如图 1 所示超声相控阵扫描原理图中, xoy 平面内 M 个压电阵元沿 x 轴等间距均匀排列成一条线阵,各压电阵元之间的间距为 d 。点 $P(r, \theta)$ 为监测远场区任意一点, r 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

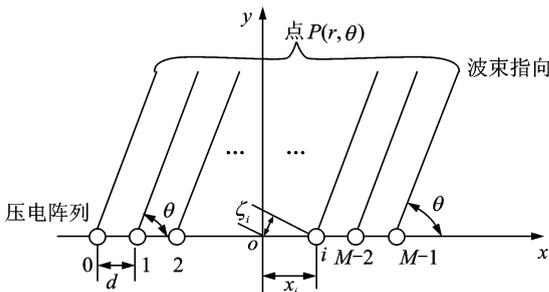


图 1 超声相控阵监测原理

Fig. 1 Principle of ultrasonic phased array

电阵元的坐标为 $(x_i, 0)$, $i = 0 \sim M-1$ 。 $x_i = [i - (M-1)/2] \cdot d$ 。

阵元发射信号时,远场区 $P(r, \theta)$ 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

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

式中: K_1 为发射过程中信号传播一定距离后幅值的衰减系数; $S_c(t)$ 表示激励信号; r/c 为信号从坐标原点传播到 P 点所需要的时间; c 为超声波在板中传播的群速度; $\delta_i(\theta)$ 为第 i 个压电阵元相对于坐标原点到达 P 点的时间差,其中, $\delta_i(\theta) = x_i \cdot \cos\theta/c$, $i = 0 \sim M-1$,该时间差由第 i 个压电阵元相对于坐标原点到达 P 点的波程差 $\xi_i(\theta) = x_i \cdot \cos\theta$ 所引起。

由于各阵元到达 P 点的时间存在一定差异,则需对各阵元激发的激励信号在时间上进行一定的补偿,使各激励信号同时到达 P 点。那么,若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

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

式中:如果时间延迟 $\Delta t_i(\theta)$ 与时间差 $\delta_i(\theta)$ 相等,即: $\Delta t_i(\theta) = \delta_i(\theta)$, $i = 0 \sim M-1$,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

$$S_P(t) = K_1 \cdot M \cdot S_c \left(t - \frac{r}{c} \right) \quad (3)$$

要求波束指向为 θ ,则各阵元激发的激励信号的时间延迟为

$$\Delta t_i(\theta) = \frac{x_i \cdot \cos\theta}{c} = \frac{\left(i - \frac{M-1}{2} \right) d \cdot \cos\theta}{c} \quad (4)$$

通过控制时间延迟,就可以按照预定的偏转角度控制主波束的偏转方向。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各传感器可以接收预定偏转角度方向上的目标信息。

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,当波束对准目标时,回波信号能量最强,当目标偏离波束时回波信号减弱。根据接收回波最强时的波束指向,可确定目标的方向。然后分析目标所在角度的信号可以确定出损伤所在具体位置。

相控阵结构健康监测的流程如图 2 所示。信号在发射过程中,各压电阵元作为驱动器需要激发

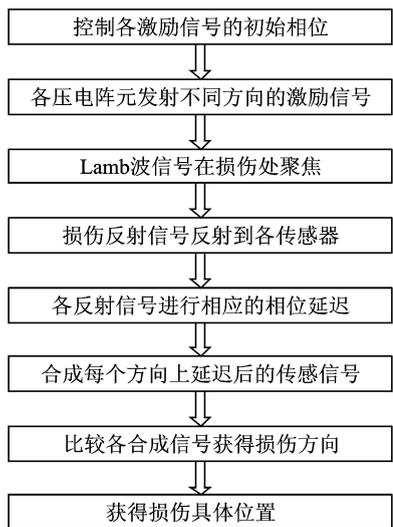


图 2 相控阵结构健康监测成像流程图

Fig. 2 Flow chart of phased array based structure health monitoring and image

不同方向的激励信号,每个驱动器在不同方向上激发的激励信号是通过基准激励信号经过时间延迟得到的,时间延迟的控制实质上是控制每个驱动器在不同监测方向激发激励信号的触发时间。时间延迟 $\Delta t_i(\theta)$ 是根据作为驱动器的压电阵元的标号与监测角度计算得到,将不同驱动器不同方向计算得到的时间延迟附加于基准激励信号中得到每个驱动器在不同方向的激励信号。因此,采集到的传感器响应信号为不同方向的信号,即在超声相控阵结构健康监测成像的研究中,数据采集过程采用方向扫描的方式进行采集,在扫描角度范围内每个扫描方向上进行数据采集,而且每个扫描方向上,各压电阵元需要轮流作为驱动器或传感器采集数据。 M 个压电阵元组成的阵列,在 $[0^\circ, \theta^\circ]$ 扫描角度方位内,采集的数据个数为 $M \times (M-1) \times (\theta+1)$ 个。例如,由 9 个压电阵元组成的阵列在结构半平面内 $[0^\circ, 180^\circ]$ 进行监测实验时,结构的健康状态下或者损伤状态下采集的传感器响应信号个数为 $9 \times 8 \times 181 = 13\ 032$ (个),一种结构状态下的数据采集时间通常为 6 h,那么在结构健康状态和损伤状态两种情况下采集时间则为 12 h,即完成一次实验的数据采集为 12 h。实验时间较长,温度等环境因素的变化使误差增大;尤其是不能满足工程应用中实时监测的要求。为此,针对利用超声相控阵原理进行结构健康监测的实验时间太长,对数据采集过程进行改进,以消除实验时间较长带来的各种影响。

2 无方向扫描数据采集的相控阵方法

改进的数据采集采用无方向扫描方式进行,即在压电阵元之间采用轮循方式进行数据采集。无方向扫描的数据采集方式:压电阵列中的各压电阵元轮流作为驱动器向结构中激发激励信号,当其中一个压电阵元作为驱动器时,其他压电阵元则作为传感器接收结构的响应信号,其流程图如图 3 所示。改进的数据采集过程与原数据采集过程相比,每组驱动器-传感器只采集一组数据,并没有在 180° 范围内进行扫描。而 180° 范围内的扫描是在数据采集之后通过信号处理实现的,即将每组驱动器-传感器采集的响应信号,在 180° 范围内每隔 1° 方向上附加相应的时间延迟,从而得到该组驱动器-传感器在每个角度上的响应信号。因此,利用改进的数据采集方式进行实验时,在结构的健康状态或者损伤状态下采集的数据个数仅为: $9 \times 8 = 72$ (个),数据采集的时间仅为原实验时间的 $1/181$,

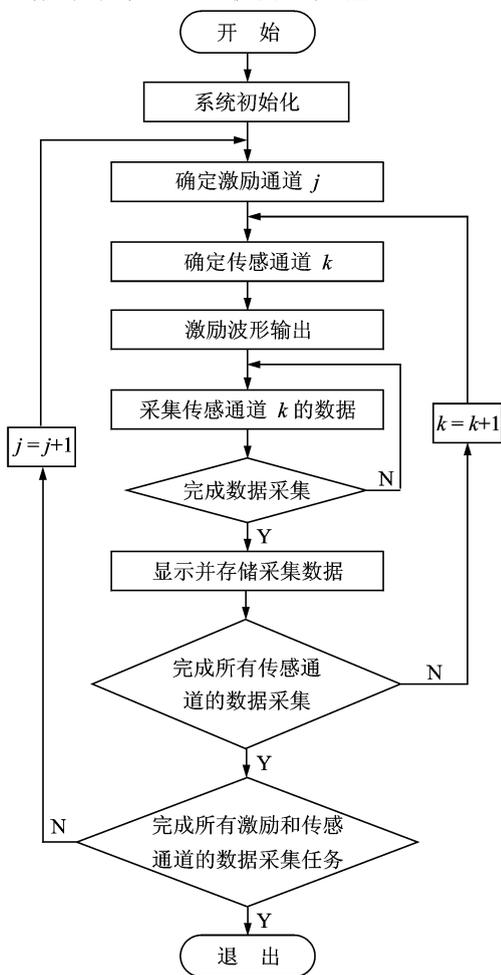


图 3 无方向扫描的数据采集软件流程图

Fig. 3 Data acquisition software flow chart of no-direction scanning

约为 2 min, 而完成一次实验的数据采集也仅为 4 min, 大大缩短实验中数据采集过程。

数据采集后, 通过健康信号与损伤信号的比较得到损伤散射信号。当结构发生损伤时, 驱动器发射的激励信号在结构中传播时遇到损伤会产生散射, 传感器响应信号中除包含直达波、边界反射信号等还包含损伤散射信号, 因此, 通过将损伤状态下采集的传感器响应信号与健康状态损伤进行比较, 获得反映结构状态的损伤散射信号。然后根据超声相控阵原理, 分别在信号的发射过程和接收过程计算并附加相应的时间延迟 $\Delta t_i(\theta)$, 控制信号形成不同角度的扫描信号, 使其在一定范围内扫描。在扫描过程中, 当 Lamb 波波束指向损伤目标时产生的损伤散射信号会反射回至各压电阵元, 压电阵元接收的反射信号中, 损伤方向的信号能量最大。以信号能量为参数, 把扫描范围内各方向响应信号的能量按照其对应的角度用灰度图像的方法显示出来, 即将传感器响应信号各点能量映射为图像矩阵中各点的像素值, 则超声相控阵扫描结果可以用图像的方法显示出来, 图像最亮处即为损伤所在处。图像灰度从暗到亮对应幅值的从小到大, 幅值最大处即为损伤所在处。其中信号各点在图像中的位置计算公式为

$$\begin{cases} x_{nm} = \rho_{nm} \cos(\theta_m), & \theta_m \in [0^\circ, 180^\circ] \\ y_{nm} = \rho_{nm} \sin(\theta_m), & \theta_m \in [0^\circ, 180^\circ] \end{cases} \quad (5)$$

$$\rho_{nm} = c \cdot (t_{nm} - t_0) = \frac{c \cdot (n_m - n_0)}{2f_s} \quad (6)$$

$$n = 0 \sim N - 1, m = 0^\circ \sim 180^\circ$$

式中: 下标 n 为数据点数, 下标 m 为角度; N 为采集信号数据总长度; x_{nm}, y_{nm} 为图像中 m 角度的信号中第 n 个点对应的横、纵坐标; θ_m 为角度; ρ_{nm} 为在 m 角度的信号中第 n 个点对应的距离; c 为 Lamb 波在结构中传播的群速度; t_{nm} 为 m 角度的合成信号中第 n 个点的到达时刻; t_0 为激励信号的到达时刻; n_m 为 m 角度的信号中第 n 个点; n_0 为激励信号到达时刻对应的点数; f_s 为采样频率。

3 实验分析与结果

为了验证无方向扫描数据采集方式的有效性, 将采用该方式采集的数据进行时间延迟控制, 通过进一步数据处理识别损伤并成像。实验系统包含压电多通道扫查系统与复合材料结构实验试件, 如图 4 所示。压电多通道扫查系统由压电激励模块、

功率放大模块, I/O 模块、增益电荷放大器模块, 数据采集模块、多通道扫查切换模块组成。实现激励信号的产生发射, 经结构传播后, 通过电荷放大器转换放大, 由数据采集模块进行响应信号的采集。

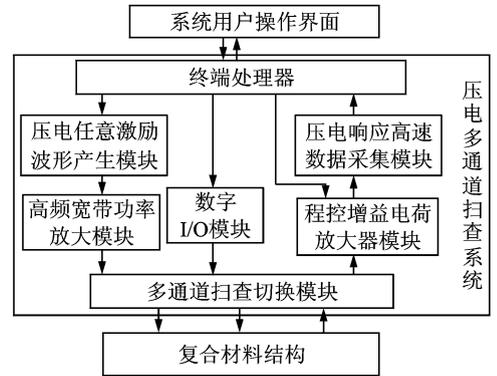


图 4 实验系统

Fig. 4 Experimental system

实验试件: 玻璃纤维增强复合材料板, 基本尺寸为 $2\,000\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, 如图 5 所示, 图 5(a) 为实验试件的实物图, 图 5(b) 为粘贴压电片的复合材料板结构局部图, 图 5(c) 结构示意图给出各参数的具体尺寸, 其中, 压电阵列由 9 个 PZT-5 压电片组成, 压电片直径为 8 mm, 厚度为 0.48 mm, 相邻两个压电片的中心间距为 12 mm。结构上 9 个压电片的标号从上而下依次为 0~8 号, 以压电阵列中心位置为原点, 所在直线为横轴, 压电片标号从小到大方向为正方向建立坐标系, 加载位置为: $(78^\circ, 125\text{ mm})$, 加载质量块质量为 0.5 kg。

驱动器激发的激励信号为的 5 波峰窄带正弦调制信号, 波峰数的确定需从时域和频域两个方面综合考虑, 激励信号中包括越多的信号周期, 频带宽度越窄、频散现象就越小。但从时域的角度来看, 激励信号中的波峰数如果过多, 那么激励波最后一个波峰与反射波的第一个波峰就会相继很近或者相互覆盖, 将会影响分析。一般用来估计最大峰值的标准是信号的时宽不能大于信号传播到接收点的传播时间, 5 个波峰的 Lamb 波时宽与传播时间的时差最小, 即激励信号与接收信号交叉的最小, 因此选择 5 个波峰的 lamb 作为激励信号, 表达式为

$$S(t) = A [H(t) - H(t - n/f_c)] \times \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi f_c t}{n}\right)\right) \sin 2\pi f_c t \quad (7)$$

式中: A 为信号幅值, f_c 为信号中心频率, $H(t)$ 为

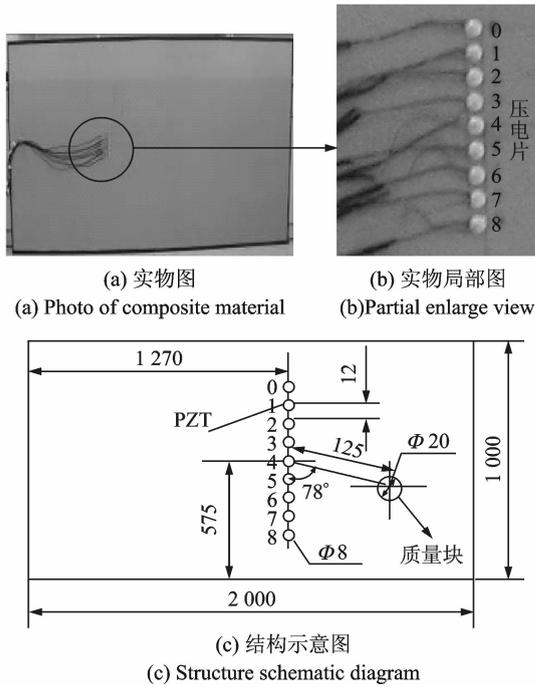


图 5 实验试件
Fig. 5 Experimental specimen

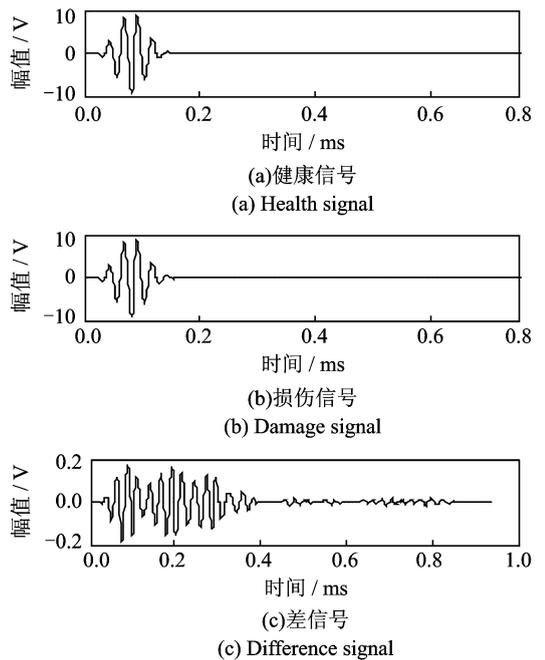


图 7 传感器响应信号与差信号
Fig. 7 Sensor response signals and difference signal

Heaviside 阶梯函数, n 为 \sin 调制信号的波峰数。

实验中激励信号的中心频率为 40 kHz, 峰峰值为 ± 10 V, 由于采用无方向扫描的数据采集方式, 无需控制各驱动器的触发时间, 即激励信号没有附加时间延迟, 各驱动器激发的激励信号波形相同, 如图 6 所示。实验的采样频率为 1.6 MHz, 激励信号到达时刻为 0.07 ms。

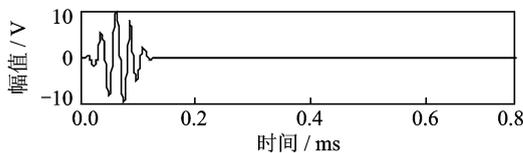


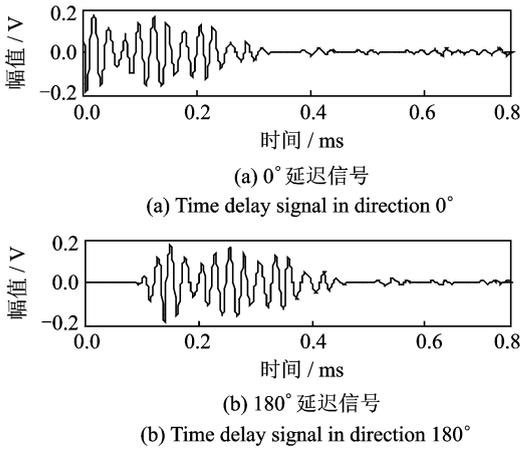
图 6 激励信号波形
Fig. 6 Excitation signal

数据采集结束后, 在结构健康状态采集的传感器响应信号作为参考信号, 结构损伤状态下采集的传感器响应信号与之相比较得到差信号, 如图 7 为 0 号压电片作为驱动器, 1 号压电片作为传感器时的响应信号与由其计算的差信号, 差信号的产生是因为结构中损伤的存在而引起。

差信号进行相应的时间延迟处理, 即在 $(0^\circ \sim 180^\circ)$ 范围内, 分别在信号的发射过程和接收过程计算相应的时间延迟 $\Delta t_i(\theta) = [i - (M - 1) / 2] \cdot d \cdot \cos\theta / c$, 其中, i 为驱动器 (发射过程) 或者传感器 (接收过程) 的标号, 压电阵列中阵元个数 M 为 9, 阵元间距 d 为 12 mm, θ 为信号波束指向, 玻璃纤

维增强复合材料板结构中 Lamb 波群速度 $c = 1.2$ km/s。信号发射过程中, 时间延迟是根据驱动器的标号和信号波束指向角度计算得到, 而信号接收过程, 时间延迟则是根据传感器的标号和信号波束指向角度计算得到的。然后将各角度的时间延迟附加于相应的差信号, 从而得到该驱动器-传感器相对应的 181 个不同角度的信号。由于在 180° 范围内每个角度进行时间延迟的差信号比较多, 在此仅介绍一个差信号经过时间延迟的计算过程与图例, 其他的差信号附加时间延迟的过程与此相同。例如: 对图 7(c) 差信号进行相应的时间延迟, 即 0 号压电片作为驱动器、1 号压电片作为传感器时的差信号, 分别在 0° 和 180° 方向对其附加时间延迟得到相应方向的信号如图 8 所示。其中, 0° 和 180° 方向的时间延迟计算值分别为 $\Delta t(0^\circ) = \Delta t_0(0^\circ) + \Delta t_1(0^\circ) = -0.07$ ms, $\Delta t(180^\circ) = \Delta t_0(180^\circ) + \Delta t_1(180^\circ) = 0.07$ ms, 计算结果负值表示将信号向左移动, 正值表示将信号向右移动, 即 0° 方向信号是通过将无方向扫描得到的差信号向左移动 0.07 ms 得到, 180° 方向的信号时通过将无方向扫描得到的差信号向右移动 0.07 ms 得到。

各差信号进行相应的时间延迟后, 同一方向各延迟后差信号进行累加合成该方向上的信号。然后, 为了避免成像后的监测图像成斑点状, 取延迟累加后合成信号绝对值包络线, 并且为了使图像的灰度级规划为 $[0, 1]$ 之间, 对合成信号绝对值包

图8 0° 和 180° 方向延迟后信号Fig. 8 Time delay signals in direction 0° and 180°

络进行归一化处理,即合成信号绝对值包络中每点的幅值与所有信号的最大幅值相比较得到该点的相对幅值,归一化合成信号绝对值包络如图9所示。图中可以看到,信号存在旁瓣,可能由于获取差信号过程中,健康信号与损伤信号的相位不同等原因引起,但旁瓣的幅值与损伤散射信号的峰值有一定差距,因此其存在并不影响损伤的识别。比较各个角度上的信号,能量最强(相对幅值为1)的信号所在的角度即为损伤所在的方向,分析损伤所在方向的合成信号,根据式(5)计算出损伤所在位置的极径,从而获得损伤的具体位置。

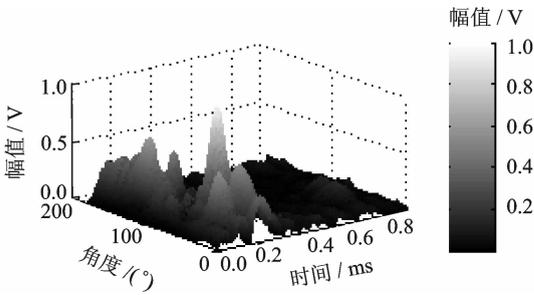


图9 归一化合成信号绝对值包络

Fig. 9 Normalize amplitude envelope of composite signal

把 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内归一化合成信号绝对值包络的幅值按照其角度用灰度的形式画在同一个图上得到损伤图像,如图10所示,图中灰度的从暗到亮对应信号幅值的从弱到强,为了提高图像的可识别度,设定幅值的阈值为0.7,即图像中仅显示幅值高于0.7的像素点。从图10中可以看到旁瓣的幅值并不高于阈值,对识别的结果没有影响。图10中幅值最大处为损伤所在位置,其中,监测损伤结果为 $(77^\circ, 122 \text{ mm})$,与实际损伤位置 $(78^\circ, 125 \text{ mm})$ 相比较,角度误差为 1° ,距离误差为4 mm。角

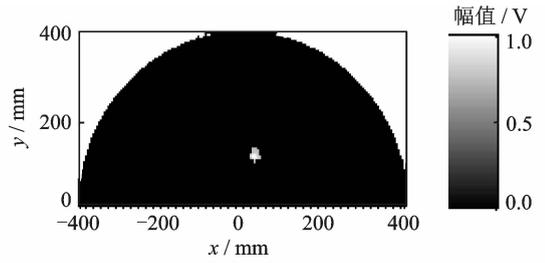


图10 超声相控阵监测成像结果

Fig. 10 Result image based on ultrasonic phased array

度误差的计算是通过监测损伤位置与真实损伤位置的角度直接相减获得,而距离误差是通过余弦定理计算得出的,即

$$\begin{cases} \Delta\theta = |\theta_m - \theta_r| \\ \Delta r = \sqrt{r_m^2 + r_r^2 - 2r_m \cdot r_r \cdot \cos(\Delta\theta)} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Delta\theta$ 为监测损伤与真实损伤之间的角度误差, θ_m 为监测损伤位置的角度, θ_r 为实际损伤位置的角度, Δr 为监测损伤与真实损伤之间的距离误差, r_m 为监测损伤位置的距离, r_r 为真实损伤位置的距离。

改进前后数据采集方式的区别在于激励信号中时间延迟的控制,按方向扫描的数据采集方式是通过控制激励信号的时间延迟形成不同波束指向的Lamb波,然后进行数据采集;而改进后无方向扫描的数据采集方式并没有为激励信号附加时间延迟,各方向采用统一的激励信号进行数据采集,然后根据不同方向不同驱动器/传感器对响应信号进行相应的时间延迟,从而得到各方向的响应信号。因为时间延迟的控制实际是信号时间延迟的控制,信号从驱动器激发通过介质传播到传感器的传播过程并未发生变化,所以,预先控制信号的时间延迟然后在板结构中传播,与信号首先在结构中传播然后计算相应的时间延迟,其本质是相同的。因此,改进前后的数据采集方式均有效,且改进后无方向扫描的数据采集方式使实验时间大大缩短,有效提高工作效率。

4 结束语

利用超声相控阵思想,采用无方向扫描的数据采集方式,利用同一激励信号进行触发,各传感器采集全方向传感信号,根据采集方式的特点与相控阵原理,分析损伤散射信号,对发射过程与接收过程进行时间延迟控制,获得相应方向的扫描信号,实现对结构的损伤识别与成像。该方法在玻璃纤维复合材料板结构上的实验研究证明,采用无方向

数据采集方式的超声相控阵方法能够精确监测结构中损伤并且监测图像能够清晰表征结构损伤;同时,该方法可以大大缩短监测时从而使监测不受环境条件变化的影响,对方法的实用化具有积极意义。

参考文献:

- [1] 袁慎芳. 结构健康监测[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.
Yuan Shenfang. Structural health monitoring and damage control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [2] Zhang X Y, Yuan S F, Liu M L, et al. Analytical modeling of lamb wave propagation in composite laminate bonded with piezoelectric actuator based on mindlin plate theory[J]. Journal of Vibroengineering, 2012, 14(4): 1681-1700.
- [3] Linker K P, Janapati V, Roy S, et al. A model-assisted integrated diagnostics for structural health monitoring[C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu, Hawaii: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012: 1-14.
- [4] Qiu L, Yuan S F, Zhang X Y, et al. A time reversal focusing based impact imaging method and its evaluation on complex composite structures[J]. Smart Materials & Structures, 2011, 20(10): 105014.
- [5] Cai J, Shi L H, Yuan S F, et al. High spatial resolution imaging for structural health monitoring based on virtual time reversal[J]. Smart Materials & Structures, 2011, 20(5): 055018.
- [6] 蔡建, 袁慎芳, 张逍越, 等. Lamb波双面激励方法及其在近邻损伤监测中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(1): 62-67.
Cai Jian, Yuan Shenfang, Zhang Xiaoyue, et al. Lamb wave double side excitation and its application in adjacent damage monitoring [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 42(1): 62-67.
- [7] Yan G, Zhou L. Damage detection for composite structure under temperature changes using lamb waves[J]. Transactions of Nanjing Aeronautics & Astronautics, 2011, 28(3): 231-239.
- [8] Yu L Y, Bottai S G, Giurgiutiu V, et al. Shear lag solution for tuning ultrasonic piezoelectric wafer active sensors with application¹'s to lamb wave array imaging [J]. International Journal of Engineering Science, 2010, 48(10): 848-861.
- [9] Yu L, Giurgiutiu V. Design, implementation, and comparison of guided wave phased arrays using embedded piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring[C]// Proc of SPIE. San Diego: CA, 2006:1-12.
- [10] Giurgiutiu V. Development and testing of high-temperature piezoelectric wafer active sensors for extreme environments [J]. Structural Health Monitoring, 2010, 9(6):513-525.
- [11] Giridhara G, Rathod V T, Naik S, et al. Rapid localization of damage using a circular sensor array and lamb wave based triangulation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(8): 2929-2946.
- [12] Kim D, Philen M. Guided wave beamsteering using MFC phased arrays for structural health monitoring: Analysis and experiment [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(10): 1011-1024.
- [13] Yan F, Rose J L. Guided wave phased array beam steering in composite plates [C]//Proc of SPIE. San Diego, California:SPIE, 2007:1-9.
- [14] Purekar A S, Pines D J. Damage detection in thin composite laminates using piezoelectric phased sensor arrays and guided lamb wave interrogation [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(10):995-1010.
- [15] 美国无损检测学会编. 美国无损检测手册·超声卷(上册)[M]. 上海:世界图书出版公司, 1996:438-444.
American Society of Nondestructive Testing. American nondestructive testing manual (Ultrasonic) [M]. Shanghai:World Publishing Corporation, 1996: 438-444.
- [16] 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.

作者简介:孙亚杰(1980-),女,讲师,研究方向:结构健康监测、信号处理,E-mail:syj@nuist.edu.cn;张永宏(1974-),男,教授,博士生导师,研究方向:超声检测、模式识别;季赛(1976-),男,副教授,研究方向:计算机控制。