



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110687208 A

(43)申请公布日 2020.01.14

(21)申请号 201910918474.7

(22)申请日 2019.09.26

(71)申请人 华东理工大学

地址 200237 上海市徐汇区梅陇路130号

(72)发明人 项延训 轩福贞 涂善东 徐吉超
朱武军

(74)专利代理机构 上海智信专利代理有限公司
31002

代理人 邓琪

(51)Int.Cl.

G01N 29/14(2006.01)

G01N 29/44(2006.01)

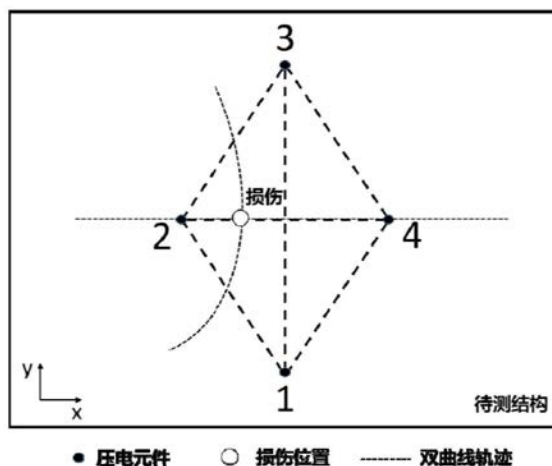
权利要求书2页 说明书7页 附图5页

(54)发明名称

一种基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法

(57)摘要

本发明提供一种基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法,包括:在待测结构上布置菱形的压电激励/传感阵列;选择对角线上的压电传感器作为激励源激励出单一Lamb波模式的激励信号,选择另一对角线上的一对压电传感器采集得到结构响应信号;对对角线上的其余压电传感器重复上述步骤,获取结构响应信号对应的损伤散射信号的时间差,并确定时间差的正负性;采用双曲线定位方法,计算出损伤位置和大致范围。本发明的Lamb波损伤监测方法阵列形式简单且个数较少,实验测量操作简单,利用双曲线损伤定位原理,在无需基准信号的情况下,实现结构损伤的检测和监测,因此,不受结构和外部条件变化带来的影响,提高了结构损伤监测的准确性。



● 压电元件 ○ 损伤位置 ----- 双曲线轨迹

1. 一种基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法,其特征在于,包括:

步骤S1:在一待测结构上,根据所需的监测区域大小,布置一个菱形的压电激励/传感阵列;

步骤S2:选择位于所述菱形的压电激励/传感阵列的一条对角线上的一个压电传感器作为激励源,在待测结构中激励出单一Lamb波模式的激励信号,同时选择与该对角线垂直的直线上的一对压电传感器作为接收器,分别采集得到对应于当前激励源的一对结构响应信号;

步骤S3:依次将对角线上的其余的压电传感器作为激励源,分别重复步骤S2,采集得到对应于不同激励源的多对结构响应信号;

步骤S4:获取每一对结构响应信号所对应的一对损伤散射信号的时间差;通过分别观察每一对结构响应信号中的各自的损伤散射信号,定性判断先后达到顺序,从而确定出所述时间差的正负性,进而判断出损伤位置分别距离作为接收器的一对压电传感器的远近;

步骤S5:采用双曲线定位方法,计算得出损伤位置和大致范围,包括:

步骤S51:根据步骤S4得到的时间差,并通过所述激励信号在所述待测结构内传播的群速度 c ,计算损伤散射距离差;根据损伤散射距离差得到双曲线轨迹,并结合所有双曲线轨迹计算得到损伤位置;

步骤S52:对所述待测结构的监测区域进行微小单元划分,并建立坐标矩阵和相对应的图像矩阵,再根据一概率密度函数对图像矩阵中的每一个元素进行像素赋值,得到损伤定位聚焦图像;随后根据所述激励/传感阵列的各压电传感器的坐标,以及所述步骤S51中得到的损伤位置,对损伤位置的大致范围进行定位成像。

2. 根据权利要求1所述的基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法,其特征在于,在所述步骤S1中,所述菱形的压电激励/传感阵列由 $4s$ 个压电传感器组成,所述压电激励/传感阵列的每条边上分别设有 $s+1$ 个等间隔分布的压电传感器, s 为正整数。

3. 根据权利要求2所述的基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法,其特征在于,在所述步骤S1中,所述压电激励/传感阵列由4个压电传感器组成,且所述压电激励/传感阵列为正方形。

4. 根据权利要求1所述的基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法,其特征在于,在所述步骤S2中,所述单一Lamb波模式的激励信号通过一信号发生器产生的一超声窄带信号经过一功率放大器后加载到所述激励源上,并通过调节频率来激励;所述结构响应信号通过将接收器接收到的信号经一数字示波器采集进入一计算机,来分别采集得到。

5. 根据权利要求1所述的基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法,其特征在于,所述步骤S4包括:

步骤S41:将步骤S2和步骤S3采集得到的所有结构响应信号进行归一化处理,以消除各压电传感器性能差异带来的误差;

步骤S42:将每一对归一化后的结构响应信号分别进行作差相减,根据中垂线定理,相减后将互相抵消结构响应信号中的直接传感信号,从而分离得到一对损伤散射信号,并根据这一对损伤散射信号各自的信号峰值对应的时间点确定这一对损伤散射信号的时间差。

6. 根据权利要求1所述的基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法,其特征在于,在所述步骤S4中,所述的一对损伤散射信号的时间差 Δt_{iAB} 为:

$$\Delta t_{iAB} = t_{iA} - t_{iB},$$

其中, t_{iA} 和 t_{iB} 分别表示作为激励源的压电传感器 P_i 到作为接收器的一对压电传感器 P_A, P_B 的损伤散射时间, i 为作为激励源的压电传感器的序数, A 和 B 分别是作为接收器的压电传感器的序数; 当 $i=1\sim 4$ 时, 若 $i=1$ 或 3 , $A=2$, $B=4$, 若 $i=2$ 或 4 , $A=1$, $B=3$;

且在所述步骤S4中, 当 Δt_{iAB} 为负时, 损伤位置靠近第 A 个压电传感器 P_A , 远离第 B 个压电传感器 P_B ; 当 Δt_{iAB} 为正时, 损伤位置远离第 A 个压电传感器 P_A , 靠近第 B 个压电传感器 P_B , 当 $\Delta t_{iAB}=0$ 时, 损伤位置位于第 A 个压电传感器 P_A 与第 B 个压电传感器 P_B 的连线的中垂线上, 或者所述待测结构中没有损伤。

一种基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法

技术领域

[0001] 本发明属于结构健康监测领域,具体涉及一种基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法,用于损伤的定位成像研究。

背景技术

[0002] 随着对结构安全性、可靠性要求的不断提高,结构损伤的在线监测和诊断日益引起人们的高度重视,为了防止结构损伤所带来的灾难或损失,必须对结构进行有效的损伤监测。板状结构是重大工程结构的主要形式之一,其实时在线的结构健康监测得到极大重视。Lamb波是在自由边界条件下,固体板状结构中传播的弹性波,由于其衰减小、传播距离远,且对结构中的微小损伤十分敏感,对板状结构大面积无损检测具有很大优势,因此基于主动Lamb波的损伤监测技术是目前板状结构健康监测的研究热点。

[0003] 其中,绝大多数的主动Lamb波损伤监测方法都是基于基准信号,即采用结构健康状态下的响应信号作为基准信号,并用当前状态下的响应信号与基准信号相减,从而得到结构损伤状况。

[0004] 但由于基准信号与当前响应信号的采集时间不同,采集时的外部条件,如周围环境温度、结构边界及应力状况、外部振动等通常会发生变化,且内部条件,如传感器本身性能也会受到温度等因素影响,使损伤散射信号很容易淹没在结构内部和外部条件变化所引起的信号变化和噪声中,这不仅会使损伤检测难以得到准确结果,而且还影响在线监测的实时性。此外,当采集基准信号时,如果结构中已经存在损伤,基于基准信号的监测方法将无法提取由该损伤产生的损伤散射信号,也就无法得到正确的损伤监测结果。

[0005] 目前为止,为了克服现有基于基准信号的主动Lamb波损伤检测方法所存在的缺陷,有众多学者采用了各种方法对无基准的主动Lamb波损伤检测技术进行了研究。其中,现有的Lamb波损伤检测技术如时间反转【王强,严夏君,陈小惠,白利,“无基准Lamb波时间反转损伤概率成像监测方法”,《仪器仪表学报》,2013年,34(07)期,第149-155页】,贝叶斯理论【尹涛,缪傲,王祥宇,“基于Bayesian理论的无参考信号主动Lamb波损伤定位方法”,《振动工程学报》,2017年30(01)期,第33-40页】等,都实现了无基准的Lamb波损伤定位监测。

[0006] 2016年李东生等人公开了一种基于概率的Lamb波无基线损伤识别方法【李冬生,金盟道,“基于概率的Lamb波无基线损伤识别方法”,《福建建设科技》2016年06期,第29-31+34页】,其所公开的方法采用一种脉冲一回波模式的分布式主动传感网络采集信号,并通过时间窗函数和连续小波变换提取损伤散射信号的时间特征,最后利用双曲线概率成像算法进行损伤定位与成像,从而实现Lamb波无基线损伤识别。该方法同样采用双曲线概率成像算法进行无基准的结构损伤定位成像。但是现有的无基准的主动Lamb波损伤监测方法往往需要较多的压电元件组成双元压电传感阵列,其中,通过将距离很近的每两个传感器分别作为激发和接收传感器,以消除直接传感信号,突出损伤散射信号,并任选两个接收传感器构成计算双曲线轨迹的接收探头对,因此所需的传感器数量较多,且信号处理和计算十分复杂,对监测系统的性能要求较高。

[0007] 因此,有必要寻找一种布阵方式简单且个数较少,信号处理更简便的无基准Lamb波损伤监测方法。

发明内容

[0008] 本发明的目的是提供一种基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法,以实现无基准主动Lamb波的损伤定位和监测。

[0009] 为了解决上述问题,本发明提供一种基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法,包括:

[0010] S1:在一待测结构上,根据所需的监测区域大小,布置一个菱形的压电激励/传感阵列;

[0011] S2:选择位于所述菱形的压电激励/传感阵列的一条对角线上的一个压电传感器作为激励源,在待测结构中激励出单一Lamb波模式的激励信号,同时选择与该对角线垂直的直线上的一对压电传感器作为接收器,分别采集得到对应于当前激励源的一对结构响应信号;

[0012] S3:依次将对角线上的其余的压电传感器作为激励源,分别重复步骤S2,采集得到对应于不同激励源的多对结构响应信号;

[0013] S4:获取每一对结构响应信号所对应的一对损伤散射信号的时间差;并通过分别观察每一对结构响应信号中的各自的损伤散射信号,定性判断先后达到顺序,从而确定出所述时间差的正负性,进而判断出损伤位置分别距离作为接收器的一对压电传感器的远近。

[0014] S5:采用双曲线定位方法,计算得出损伤位置和大致范围,包括:

[0015] S51:根据步骤S4得到的时间差,并通过所述激励信号在所述待测结构内传播的群速度 c ,计算损伤散射距离差;根据损伤散射距离差得到双曲线轨迹,并结合所有双曲线轨迹计算得到损伤位置;

[0016] S52:对所述待测结构的监测区域进行微小单元划分,并建立坐标矩阵和相对应的图像矩阵,再根据一概率密度函数对图像矩阵中的每一个元素进行像素赋值,得到损伤定位聚焦图像;随后根据所述激励/传感阵列的各压电传感器的坐标,以及所述步骤S51中得到的损伤位置,对损伤位置的大致范围进行定位成像,实现对损伤的准确定位和监测。

[0017] 在所述步骤S1中,所述菱形的压电激励/传感阵列由 $4s$ 个压电传感器组成,所述压电激励/传感阵列的每条边上分别设有 $s+1$ 个等间隔分布的压电传感器, s 为正整数。

[0018] 在所述步骤S1中,所述压电激励/传感阵列由4个压电传感器组成,所述压电激励/传感阵列为正方形。

[0019] 在所述步骤S2中,所述单一Lamb波模式的激励信号通过一信号发生器产生的一超声窄带信号经过一功率放大器后加载到所述激励源上,并通过调节频率来激励;所述结构响应信号通过将接收器接收到的信号经一数字示波器采集进入一计算机,来分别采集得到。

[0020] 在所述步骤S2中,所述激励信号为正弦信号或窗函数调制的正弦信号。

[0021] 优选地,所述激励信号为采用汉宁窗调制的正弦信号。

[0022] 所述步骤S4包括:

[0023] S41:将步骤S2和步骤S3采集得到的所有结构响应信号进行归一化处理,以消除各压电传感器性能差异带来的误差;

[0024] S42:将每一对归一化后的结构响应信号分别进行作差相减,根据中垂线定理,相减后将互相抵消结构响应信号中的直接传感信号,从而分离得到一对损伤散射信号,并根据这一对损伤散射信号各自的信号峰值对应的时间点确定这一对损伤散射信号的时间差。

[0025] 优选地,在所述步骤S4中,所述的一对损伤散射信号的时间差 Δt_{iAB} 为:

[0026] $\Delta t_{iAB} = t_{iA} - t_{iB}$,

[0027] 其中, t_{iA} 和 t_{iB} 分别表示作为激励源的压电传感器 P_i 到作为接收器的一对压电传感器 P_A, P_B 的损伤散射时间, i 为作为激励源的压电传感器的序数, A 和 B 分别是作为接收器的压电传感器的序数;当 $i = 1 \sim 4$ 时,若 $i = 1$ 或 3 , $A = 2$, $B = 4$, 若 $i = 2$ 或 4 , $A = 1$, $B = 3$;

[0028] 且在所述步骤S4中,当 Δt_{iAB} 为负时,损伤位置靠近第 A 个压电传感器 P_A , 远离第 B 个压电传感器 P_B ; 当 Δt_{iAB} 为正时,损伤位置远离第 A 个压电传感器 P_A , 靠近第 B 个压电传感器 P_B , 当 $\Delta t_{iAB} = 0$ 时,损伤位置位于第 A 个压电传感器 P_A 与第 B 个压电传感器 P_B 的连线的中垂线上,或者所述待测结构中没有损伤。

[0029] 本发明的基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法采用现有的压电传感器来实现对角线互相垂直的菱形阵列,并选择位于一条对角线上的压电传感器作为激励源激励出单一Lamb波模式的激励信号,与该对角线垂直的直线上的一对压电传感器作为接收器来采集结构响应信号,使得阵列形式简单且个数较少,实验测量操作简单,并利用双曲线损伤定位原理,在无需基准信号的情况下,实现结构损伤的检测和监测,因此,不受结构和外部条件发生变化而带来的影响,提高了结构损伤监测的准确性,且无需大量的结构响应信号数据以及复杂的信号处理和计算步骤,具有良好的工程应用可操作性。此外,本发明的Lamb波损伤监测方法通过信号归一化和信号作差实现了对主动Lamb波激励下的损伤散射信号与直接传感信号的分离,突出损伤散射信号信息。

附图说明

[0030] 图1为根据本发明的一个实施例的基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法所采用的压电激励/传感阵列的示意图。

[0031] 图2为根据本发明的另一个实施例的基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法所采用的压电激励/传感阵列的示意图。

[0032] 图3A-图3B为根据本发明的一个实施例的基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法的所选择的单一Lamb波模式的激励信号的示意图,图3A表示单一Lamb波模式的激励信号的时域波形,图3B表示单一Lamb波模式的激励信号的频域波形图。

[0033] 图4A-图4D为如图1所示的压电激励/传感阵列所采集到的结构响应信号,其中,图4A、图4B分别表示第一压电传感器作为激励源时,第二、第四压电传感器作为接收器时采集得到的结构响应信号,图4C、图4D分别表示第二压电传感器作为激励源时,第一、第三压电传感器作为接收器时采集得到的结构响应信号。

[0034] 图5A-图5B分别为图4A-图4D所示的结构响应信号先归一化再两两作差相减得到的损伤散射信号,其中,图5A表示第二、第四压电传感器的结构响应信号先归一化再作差相减得到的一对损伤散射信号,图5B表示第一、第三压电传感器的结构响应信号先归一化再

作差相减得到的一对损伤散射信号。

[0035] 图6是所述待测结构中的损伤定位成像监测结果图。

具体实施方式

[0036] 以下结合具体实施例,对本发明做进一步说明。应理解,以下实施例仅用于说明本发明而非用于限制本发明的范围。

[0037] 本发明提供了一种基于双曲线定位的无基准Lamb波损伤监测方法,该方法包括以下步骤:

[0038] 步骤S1:如图1所示,在一待测结构上,根据所需的监测区域大小,布置一个菱形(优选为正方形,正方形是一种特殊的菱形)的压电激励/传感阵列;

[0039] 如图1所示,在本实施例中,压电激励/传感阵列由4个压电传感器 P_i ($i=1,2,3,4$)组成,待测结构为铝板结构,尺寸为 $200 \times 100 \times 1\text{mm}^3$,以板结构中心为坐标原点,压电激励/传感阵列的各压电传感器的坐标分别为第一压电传感器 $P_1(100,10)$,第二压电传感器 $P_2(60,50)$,第三压电传感器 $P_3(100,90)$,第四压电传感器 $P_4(140,50)$,单位为mm,第一压电传感器 P_1 和第三压电传感器 P_3 所在的对角线与第二压电传感器 P_2 和第四压电传感器 P_4 所在的对角线互相垂直。实验测量中的损伤形式为典型的通孔损伤,直径为5mm,圆心位置为(80,50),单位为mm。

[0040] 此外,在其他实施例中,该压电激励/传感阵列也可以由 $4s$ 个压电传感器组成, s 为正整数,且菱形的压电激励/传感阵列的每条边(包含顶点)上分别设有 $s+1$ 个等间隔分布的压电传感器,例如,如图2所示的由12个压电传感器组成的压电激励/传感阵列。由此,该压电激励/传感阵列的几何特征为对角线互相垂直,并利用压电传感器的正反压电效应进行超声Lamb波的激发和接收。在实验测量中,所述压电传感器通过瞬凝粘接剂直接粘贴在待测结构的同一侧表面上。

[0041] 步骤S2:选择位于所述菱形的压电激励/传感阵列的一条对角线上的一个压电传感器 P_i ($i=1,2,3,4$)作为激励源,在待测结构中激励出单一Lamb波模式的激励信号,同时选择与该对角线垂直的直线上的一对压电传感器 P_A, P_B 作为接收器,分别采集得到对应于当前激励源的一对结构响应信号 f_{iA}, f_{iB} ,其中,该单一Lamb波模式的激励信号优选为单一 S_0 模式的激励信号, i 为作为激励源的压电传感器的序数, A 和 B 分别为作为接收器的压电传感器的序数。例如,当如图1所示,压电激励/传感阵列由4个压电传感器组成,即 $s=1, i=1 \sim 4$ 时,若 $i=1$ 或 $3, A=2, B=4$,若 $i=2$ 或 $4, A=1, B=3$;此外,当如图2所示,压电激励/传感阵列由12个压电传感器组成,即 $s=3, i=1, 4, 7, 10$ 时,若 $i=1$ 或 $7, A=2, B=12; A=3, B=11; A=4, B=10; A=5, B=9; A=6, B=8$;若 $i=4$ 或 $10, A=3, B=5; A=2, B=6; A=1, B=7; A=12, B=8$;且 $A=11, B=9$ 。

[0042] 在本实施例中,所述激励信号为汉宁窗调制的5个周期正弦信号,中心频率为250kHz,其时域波形和频域波形分别如图3A、图3B所示。此外,所述激励信号还可以为其他窗函数调制的正弦信号,如海维赛德阶梯函数,或者直接采用正弦信号。但是一般情况下,在激励信号为采用汉宁窗调制的正弦信号,由此使得信号能量更集中,波形变化更稳定。

[0043] 例如,如图4A、图4B所示为当 $i=1$ 时,即将第一压电传感器 P_1 作为激励源,第二压电传感器 P_2 和第四压电传感器 P_4 分别作为接收器时,所采集得到的一对结构响应信号 f_{12} 、

f_{14} 的时域图。其中,所述结构响应信号 f_{12} 、 f_{14} 均可分为直接传感信号和损伤散射信号,其中直接传感信号是第一个波包峰值比较大,波形比较清晰的信号,损伤散射信号是在后的波包峰值比较小的信号,如图4B所示,直接传感信号与损伤散射信号明显分开,但有时两者是互相重叠的。如图4A、图4B所示的这一对结构响应信号 f_{12} 、 f_{14} 中的直接传感信号基本一致,而损伤散射信号有明显区别,这说明待测结构中存在损伤,且损伤位置没有位于第二压电传感器 P_2 和第四压电传感器 P_4 所在对角线的中垂线上;如图4C、图4D所示为当 $i=2$ 时,即将第二压电传感器 P_2 作为激励源,第一压电传感器 P_1 和第三压电传感器 P_3 分别作为接收器时,所采集得到的一对结构响应信号 f_{21} 、 f_{23} 的时域图,这一对结构响应信号 f_{21} 、 f_{23} 没有明显区别,说明待测结构中没有损伤或者损伤位置位于第一压电传感器 P_1 和第三压电传感器 P_3 所在对角线的中垂线上,同时根据之前一对结构响应信号 f_{12} 、 f_{14} 的判断,可初步判定损伤位置位于第一压电传感器 P_1 和第三压电传感器 P_3 所在对角线的中垂线上。

[0044] 由此,作为激励源的压电传感器 P_i 和作为接收器的一对压电传感器 P_A 、 P_B 构建为一组监测通道。本发明的检测方法所使用的硬件部分与传统方法监测系统的硬件部分相同,一般由以下部分组成:计算机、信号发生器、功率放大器、数字示波器和各种连接线。其中,所述单一Lamb波模式的激励信号通过一信号发生器产生的一超声窄带信号经过一功率放大器后加载到所述激励源上,并通过调节频率来激励;所述结构响应信号通过将接收器接收到的信号经一数字示波器采集进入一计算机,来分别采集得到。采样频率设定为25MHz。

[0045] 此外,所述步骤S2还包括:获取所述结构响应信号 f_{iA} 、 f_{iB} 中的直接传感信号与所述激励信号的时间差,再根据激励源与接收器之间的直线距离(已知),算出所述激励信号在所述待测结构内传播的群速度 c ,且假定损伤前后群速度不变。

[0046] 步骤S3:依次将对角线上的其余的压电传感器作为激励源,分别重复步骤S2,采集得到对应于不同激励源的多对结构响应信号,从而得到整个监测区域的结构响应信号。

[0047] 步骤S4:获取每一对结构响应信号所对应的一对损伤散射信号的时间差,具体包括:

[0048] 步骤S41:将步骤S2和步骤S3采集得到的所有结构响应信号进行归一化处理,以消除各压电传感器性能差异带来的误差;

[0049] 所述归一化处理采用以下公式进行:

$$[0050] \quad y(t) = \frac{x(t)}{Max},$$

[0051] 其中, $x(t)$ 为结构响应信号,Max为结构响应信号 $x(t)$ 的最大值, $y(t)$ 为归一化后的结构响应信号。

[0052] 步骤S42:将每一对归一化后的结构响应信号分别进行作差相减,根据中垂线定理,相减后将互相抵消结构响应信号中的直接传感信号,从而分离得到一对损伤散射信号,并根据这一对损伤散射信号各自的信号峰值对应的时间点确定这一对损伤散射信号的时间差 Δt_{iAB} ;即, $\Delta t_{iAB} = t_{iA} - t_{iB}$,其中, t_{iA} 和 t_{iB} 分别表示作为激励源的压电传感器 P_i 到作为接收器的一对压电传感器 P_A 和 P_B (包括第A个压电传感器 P_A 与第B个压电传感器 P_B)的损伤散射时间, i 为作为激励源的压电传感器的序数,A和B分别为作为接收器的压电传感器的序数,当 $i=1 \sim 4$ 时,若 $i=1$ 或3, $A=2$, $B=4$,若 $i=$

2或4, $A=1$, $B=3$ 。

[0053] 例如,如图5A所示,将第一压电传感器 P_1 作为激励源,第二压电传感器 P_2 和第四压电传感器 P_4 分别作为接收器时所采集得到的结构响应信号(即 $i=1, A=2, B=4$),归一化后作差相减可消除直接传感信号得到一对损伤散射信号,根据这一对损伤散射信号各自的信号峰值对应的时间点可确定一对损伤散射信号的时间差 Δt_{iAB} ;如图5B所示,将第二压电传感器 P_2 作为激励源,第一压电传感器 P_1 和第三压电传感器 P_3 分别作为接收器时所采集到结构响应信号(即 $i=2, A=1, B=3$),归一化后作差相减可消除直接传感信号,发现信号趋于平稳且在0位置上下波动,可初步判定一对损伤散射信号的时间差 $\Delta t_{iAB}=0$,且损伤位置位于第一压电传感器 P_1 和第三压电传感器 P_3 所在对角线的中垂线上。

[0054] 此外,所述步骤S4还包括:通过分别观察每一对结构响应信号中的各自的损伤散射信号,定性判断先后达到顺序,从而确定出所述步骤S4中的一对损伤散射信号的时间差 Δt_{iAB} 的正负性,进而判断出损伤位置分别距离作为接收器的压电传感器 P_A, P_B 的远近。由此,可以确定损伤位置具体在两条对称双曲线的哪一条上,可以确定损伤位置具体在某一条双曲线轨迹上,剔除伪像得到准确的损伤位置。

[0055] 其中,当所述步骤S4中的一对损伤散射信号的时间差 Δt_{iAB} 为负时,说明损伤位置靠近第A个压电传感器 P_A ,远离第B个压电传感器 P_B ;当损伤散射信号的时间差 Δt_{iAB} 为正时,说明损伤位置远离第A个压电传感器 P_A ,靠近第B个压电传感器 P_B ,当损伤散射信号的时间差 $\Delta t_{iAB}=0$ 时,说明损伤位置位于第A个压电传感器 P_A 与第B个压电传感器 P_B 的连线的中垂线上,或者待测结构中没有损伤,其中, i 为作为激励源的压电传感器的序数, A 和 B 分别为作为接收器的压电传感器的序数, $i=1\sim 4$ 时,若 $i=1$ 或 $3, A=2, B=4$,若 $i=2$ 或 $3, A=1, B=3$ 。

[0056] 例如,如图4A所示,损伤散射信号不明显,说明与直接传感信号重叠在一起;如图4B所示,损伤散射信号明显,说明在直接传感信号后面;由此说明损伤散射信号先达到第二压电传感器 P_2 ,再达到第四压电传感器 P_4 ,从而判断出时间差 Δt_{iAB} 小于0($i=1, A=2, B=4$);并由时间差 Δt_{124} 小于0可知,损伤位置靠近第二压电传感器 P_2 ,远离第四压电传感器 P_4 。此外,由上文的关于图5B的描述可知,一对损伤散射信号的时间差 $\Delta t_{iAB}=0$,且说明损伤位置位于第一压电传感器 P_1 和第三压电传感器 P_3 所在对角线的中垂线上。

[0057] 步骤S5:采用双曲线定位方法,计算得出损伤的位置和大致范围,分析判断待测结构的健康情况。

[0058] 所述步骤S5具体包括:

[0059] 步骤S51:根据所述步骤S4中的一对损伤散射信号的时间差 Δt_{iAB} ,并通过所述步骤S2中的激励信号在所述待测结构内传播的群速度 c ,计算损伤散射距离差 Δd_{iAB} ,即 $\Delta d_{iAB}=c \times \Delta t_{iAB}$;根据多个损伤散射距离差 Δd_{iAB} 得到多条双曲线轨迹,并结合所有双曲线轨迹计算得到损伤位置。

[0060] 具体地,根据几何学知识,到一对定点的距离之差为一个定值的点集合为双曲线,由此可根据每个损伤散射距离差 Δd_{iAB} 和其所对应的一对压电传感器 P_A 与 P_B 得到一对双曲线轨迹,多个损伤散射距离差 Δd_{iAB} 得到了多对双曲线轨迹,可将所有双曲线轨迹的交点最多的位置确定为损伤位置。

[0061] 由此,步骤S51已经从数学几何公式上确定了所述待测结构的损伤位置。

[0062] 步骤S52:对所述待测结构的监测区域进行微小单元划分,并建立坐标矩阵和相对应的图像矩阵,使图像矩阵中的每一个元素代表待测结构中的一个微小单元,再根据一概

率密度函数对图像矩阵中的每一个元素进行像素赋值,得到损伤定位聚焦图像;随后根据激励/传感阵列中各压电传感器的坐标,以及所述步骤S51中得到的损伤位置,对损伤位置的大致范围进行定位成像,实现对损伤的准确定位和监测。

[0063] 这里,损伤散射距离差 Δd_{iAB} 是为了得到数学几何意义上的双曲线轨迹,概率密度函数表示坐标点是损伤位置的概率密度。距离双曲线轨迹越近,表示该坐标点是损伤位置的概率值就越大,该概率值就作为定位成像的像素值。由此,实现了对图像(用二维矩阵表示)进行像素赋值,不同的像素值用不同颜色表示,颜色越深的区域,说明损伤存在的概率越大。

[0064] 其中,所述概率密度函数以及累积分布函数采用如下表达式:

$$[0065] \quad f(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z}{2\sigma}\right],$$

$$[0066] \quad F(z_{IJ}) = \int_{-\infty}^{z_{IJ}} f(z) dz$$

[0067] 相应地,损伤定位聚焦图像为:

$$[0068] \quad D_{IJ}(x_m, y_n) = 1 - [F(z_{IJ}) - F(-z_{IJ})]$$

$$[0069] \quad DI_{total} = \frac{1}{N(N-1)} \prod_{I,J=1, I \neq J}^N D_{IJ}(x_m, y_n)$$

[0070] 其中, z_{IJ} 为微小单元到作为接收器的一对压电传感器I, J所确定双曲线轨迹的最短距离,单位为mm,其中, I, J表示作为接收器的一对压电传感器的序数,比如第一压电传感器P₁作为激励源,第二压电传感器P₂和第四压电传感器P₄作为接收器,那么I, J就分别表示为2, 4; $F(z_{IJ})$ 为累积分布函数, $f(z)$ 为概率密度函数, $D_{IJ}(x_m, y_n)$ 为图像矩阵中任意一点元素的像素值, x_m, y_n 为该点在图像矩阵中的位置,单位为mm,可以反映对应微小单元的坐标, DI_{total} 表示所有压电传感器所得到的损伤定位聚焦图像, N为压电传感器的个数。

[0071] 此外,如图6所示,所述步骤S52还包括:在得到损伤定位聚焦图像后,通过对所述图像矩阵中的所有元素的像素值设置一阈值,以更加清晰准确地显示损伤位置。图例中设置的阈值为90%,就是把最大值的90%以上都显示出来,小于最大值的90%都不用显示出来。定位结果显示在实际损伤位置附近,也可以实现对损伤位置大致范围的描述。监测结果表明,本发明方法在无需基准信号的情况下,基本检测出了待测结构损伤情况,实现了无基准损伤定位监测。

[0072] 以上所述的,仅为本发明的较佳实施例,并非用以限定本发明的范围,本发明的上述实施例还可以做出各种变化。凡是依据本发明申请的权利要求书及说明书内容所作的简单、等效变化与修饰,皆落入本发明专利的权利要求保护范围。本发明未详尽描述的均为常规技术内容。

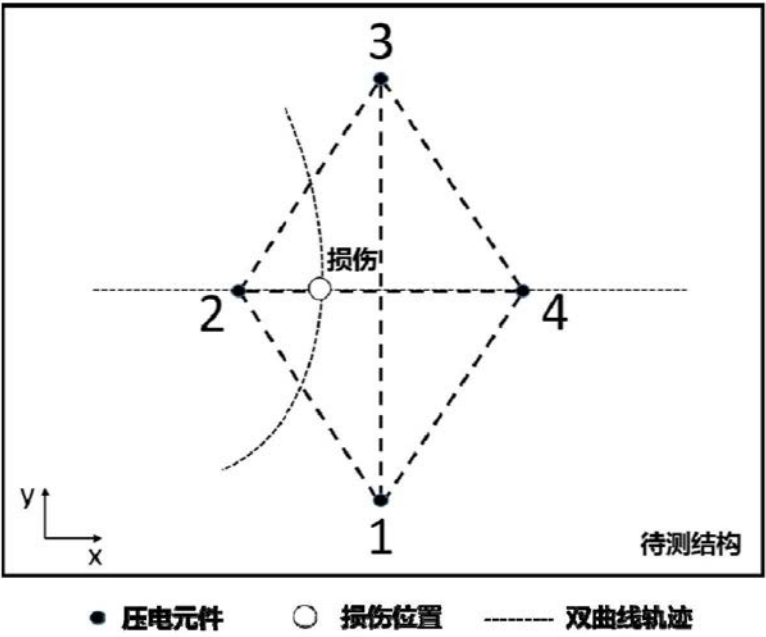


图1

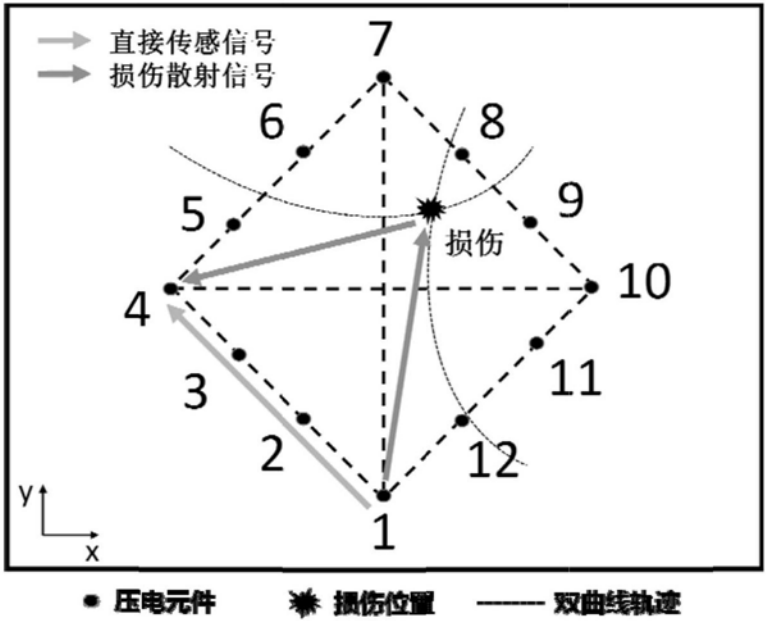


图2

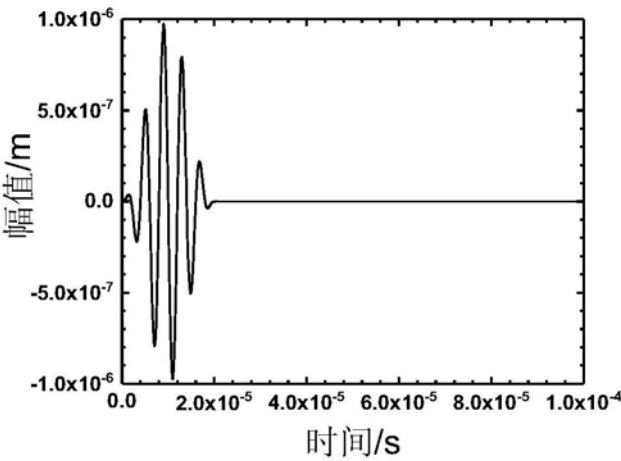


图3A

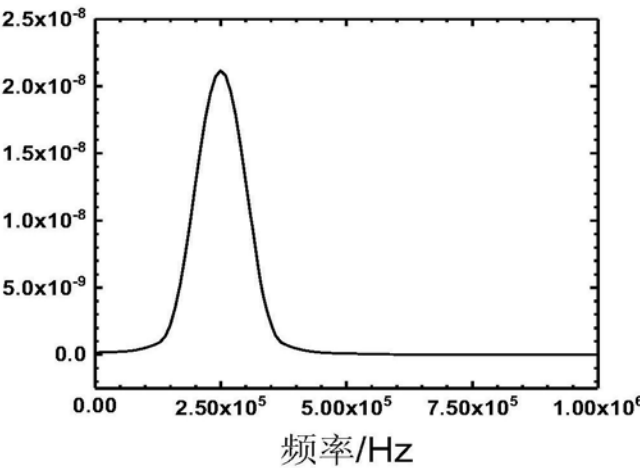


图3B

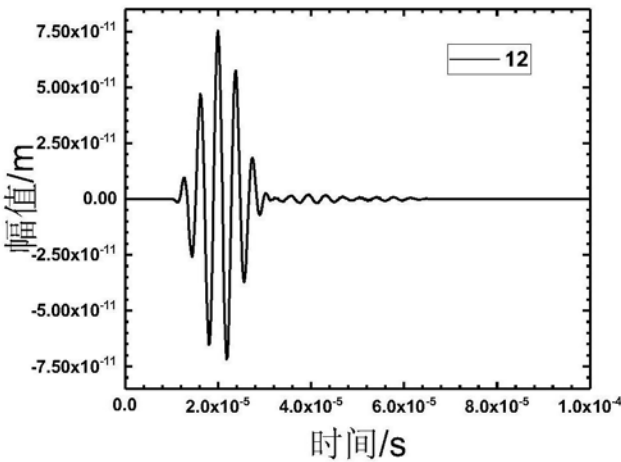


图4A

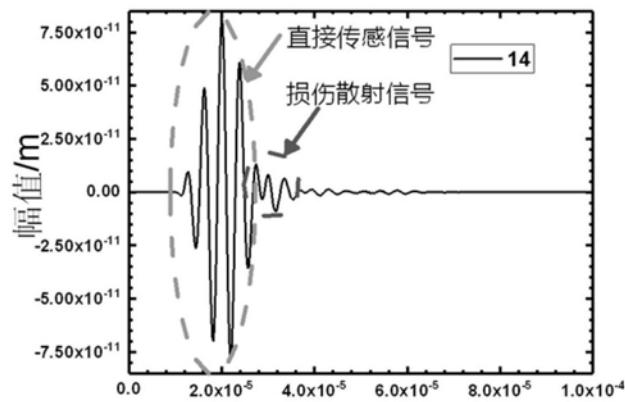


图4B

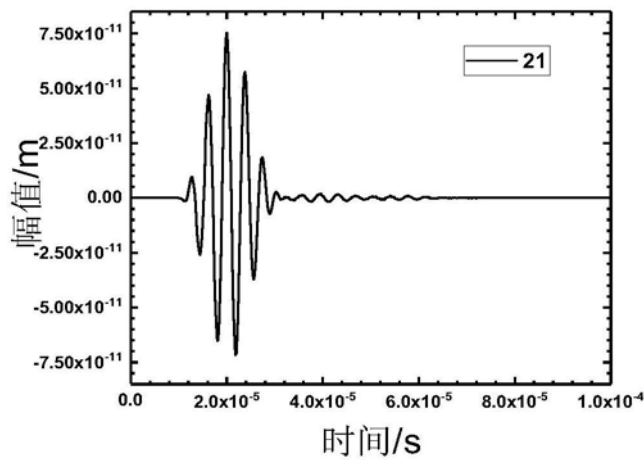


图4C

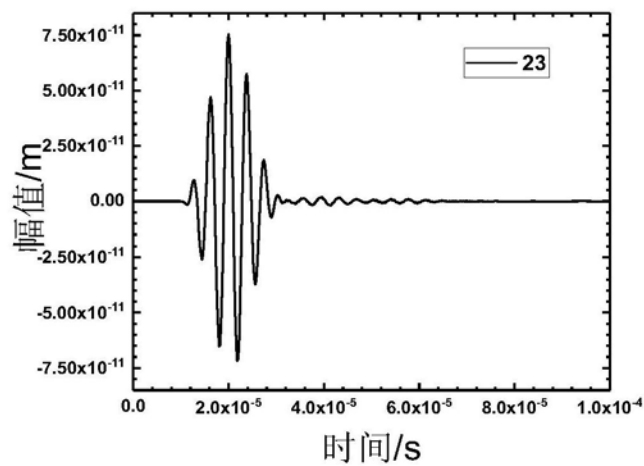


图4D

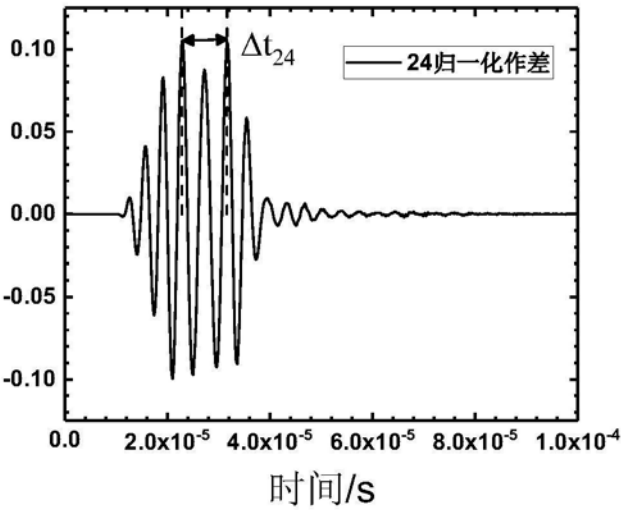


图5A

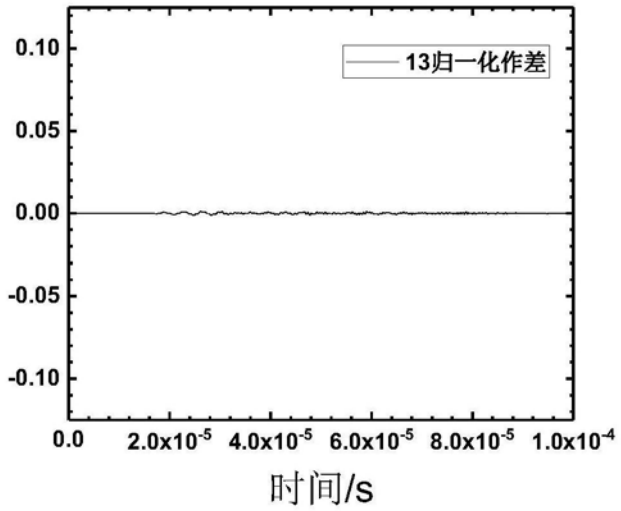


图5B

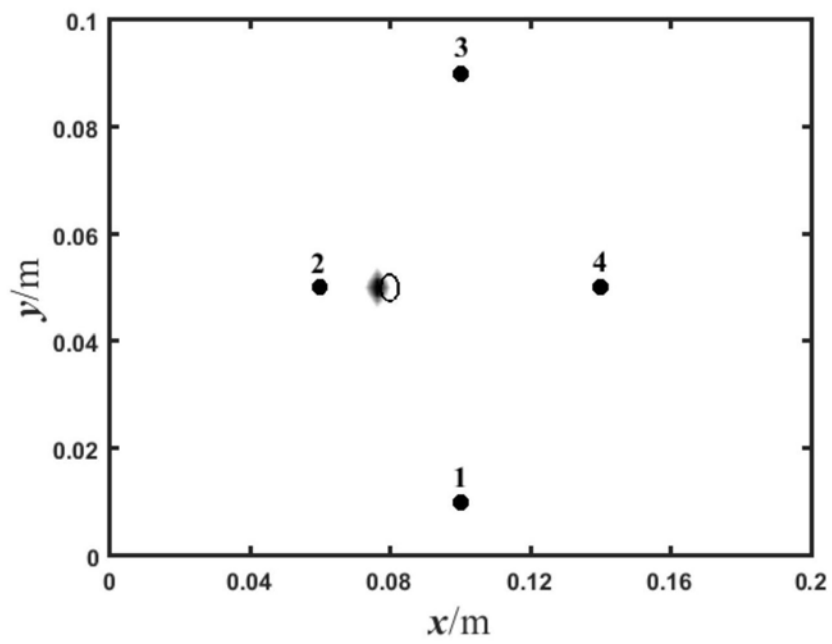


图6