

# 基于二次波的增材制造平板缺陷无损检测方法研究\*

谭栋国 周加喜<sup>†</sup> 王凯 徐道临

(湖南大学 机械与运载工程学院,长沙 410082)

**摘要** 在航天航空领域,增材制造板状结构因其优异特性而得到广泛应用.但是增材制造结构件在制造或者使用过程中极有可能会产生不同类型的缺陷,从而造成安全隐患.本文基于兰姆波在平板中具有多个路径的传播形式,提出了一种利用二次到达波的缺陷无损检测方法,并应用于增材制造平板的缺陷定位.首先,根据兰姆波的频散特性确定激励信号的中心频率和模式.设计兰姆波在板中的多种传播路径,通过预先设置的压电片传感器接收二次到达波.通过波速和消耗时间来计算从传感器到缺陷的距离,以传感器为中心、以测得的传感器到缺陷的距离为半径做圆,进而利用两圆交点定位缺陷.本文使用增材制造聚乳酸(PLA)板进行数值仿真和实验,以验证该方法的有效性,结果表明本方法可快速简便地对直径为 1mm 的通孔进行缺陷定位.研究工作对增材制造结构缺陷检测具有参考意义.

**关键词** 缺陷检测, 兰姆波, 二次到达波, 多波路径, 增材制造

**中图分类号**:O374.4;O329

**文献标志码**:A

## 引言

随着航天航空以及民用飞行器的迅速发展,增材制造结构因其轻质和高精度等优异特性在航天器、飞机机身、机翼和尾翼等关键部位得到了广泛的应用.然而增材制造结构在加工过程中及服役过程中可能产生裂纹和孔洞等缺陷,进而影响设备和装置的使用寿命和安全性.因此,发展针对增材制造结构的无损检测方法具有重要的意义.

针对传统加工工艺结构中的缺陷,国内外学者提出了许多不同的无损检测方法<sup>[1-4]</sup>,超声导波因其高效率和低成本的优异特点被广泛应用于缺陷检测<sup>[5,6]</sup>.如针对大型结构中的微型缺陷,超声导波具有良好的检测效果<sup>[7]</sup>.此外,兰姆波作为一种典型的超声导波,因其优异的频散特性适用于不同类型结构的缺陷检测,尤其在平板中表现出良好的损伤识别能力<sup>[8-11]</sup>.Su 等<sup>[12]</sup>综述了复合结构的无损检测方法,并且指出兰姆波在薄板中传播时具有弱衰减的优异特性,同时表明兰姆波在薄板中传播经过缺陷后将携带缺陷信息.因此,兰姆波通常用作平板类结构无损检测的激励信号.

兰姆波作为一种适合无损检测的激励信号,许多学者研究了其传播特性,并且利用兰姆波发展了相应的无损检测方法.Yuan 等<sup>[13]</sup>研究了兰姆波在复合材料中的传播特性,并通过实验验证了相关结论.Lee 等<sup>[14]</sup>通过数值模拟研究了金属结构中波传播的相互作用,在此基础上,进一步研究了复杂结构中的超声传播特性<sup>[15]</sup>.Baskaran 等<sup>[16]</sup>利用有限元模拟了超声飞行时间衍射(TOFD)技术.Kessler 等<sup>[17]</sup>提出了利用兰姆波对含有分层、横向层裂和通孔缺陷的复合材料进行无损检测的方法.Michaels 等<sup>[18]</sup>设计了一种两步缺陷检测方法,即先大致识别缺陷后对其精准定位和特征化.Zhu 等<sup>[19]</sup>针对含有多个损伤的平板,设计实现了一种多部位快速实时成像技术.

实际上,激励信号在平板上传播时存在多个传播路径.但是由于结构的复杂性,一般情况下难以使用多个传播路径来进行缺陷检测.然而,经不同路径传播的波通常携带大量缺陷信息<sup>[20]</sup>.因此,针对不同传播路径,研究人员提出了不同的无损检测方法.Hall 等<sup>[21]</sup>基于不同传播路径的导波提出了一种多导波成像算法.Ebrahimkhanlou 等<sup>[22]</sup>基于模型

2021-03-09 收到第 1 稿,2021-04-21 收到修改稿.

\* 国家重点研发计划项目(2017YFB1102801)

<sup>†</sup> 通信作者 E-mail: jxizhou@hnu.edu.cn

研究了一种导向超声成像算法,该方法可以通过平板边界反射的超声回波增强成像效果。

随着增材制造技术的发展,其将在某些特殊领域逐步取代传统的加工技术<sup>[23]</sup>。例如,在航空航天领域中,应用增材制造技术可以制造高精度的个性化零件<sup>[24]</sup>。但是,Ahsan等<sup>[25]</sup>发现增材制造组件中极易出现层间和层内缺陷,这些损坏可能会降低增材制造组件的性能。因此,针对增材制造结构中的缺陷发展相应的无损检测技术具有重要意义。Cerniglia等<sup>[23]</sup>使用两种非破坏性测试技术(激光超声和激光热成像)对增材制造组件进行缺陷检测。这两种检测方法因其高成本而无法广泛应用,并且对于微型缺陷其检测精度将大幅降低。

基于前人的工作<sup>[21,22]</sup>,本文利用兰姆波在传播过程中弱衰减和多模式的频散特性等优势,提出了一种基于多个传播路径中二次到达波进行缺陷定位的无损检测方法。并将解决微小(直径1mm)缺陷检测方面的难题。首先,分析了兰姆波在增材制造平板中的传播特性,以确定激励源的中心频率和模式。其次,通过设计波传播路径,利用二次到达波携带的损伤信息来定位缺陷。最后,通过有限元分析和实验验证了该方法的有效性。

## 1 兰姆波的频散特性

当声波在薄板中传播时,将在板的两个自由边界面上反射,然后叠加形成兰姆波。兰姆波可分为两类:对称模式(S)和反对称模式(A)。频散特性是兰姆波在薄板中传播的主要特征之一。下面简要分析兰姆波的频散特性。

根据弹性固体中的波传播理论<sup>[26]</sup>,运动方程有如下形式:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为位移场, $\lambda$ 和 $\mu$ 为兰姆波相关常量, $\rho$ 是材料密度, $\nabla = \mathbf{i}_1 \partial / \partial x_1 + \mathbf{i}_2 \partial / \partial x_2 + \mathbf{i}_3 \partial / \partial x_3$ ,位移矢量可以由势函数 $\varphi$ 和 $\psi$ 表示:

$$\mathbf{u} = \nabla \varphi + \nabla \times \boldsymbol{\tau} \psi \quad (2)$$

式中, $\nabla \times \boldsymbol{\tau} \psi$ 是 $\psi$ 的旋度。将式(2)代入式(1)得到:

$$\nabla [(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \varphi - \rho \ddot{\varphi}] + \nabla \times [\mu \nabla^2 \boldsymbol{\tau} \psi - \ddot{\boldsymbol{\tau}} \rho] = 0 \quad (3)$$

考虑薄板中的平面应变,并且使势函数 $\varphi$ 和 $\psi$ 满足运动方程,则有以下关系:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} = \frac{1}{c_L^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \psi_z}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi_z}{\partial x_2^2} = \frac{1}{c_T^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi_z}{\partial t^2} \quad (5)$$

式中, $c_L^2 = (\lambda + 2\mu)/\rho$ , $c_T^2 = \mu/\rho$ 。

为了研究弹性层中的波动,假设式(4)和式(5)有如下形式的解:

$$\varphi = \Phi(x_2) \exp[i(kx_1 - \omega t)] \quad (6)$$

$$\psi_z = \Psi(x_2) \exp[i(kx_1 - \omega t)] \quad (7)$$

式中, $k = \omega/c_p$ 是波数, $\omega$ 是波的频率。将式(6)和式(7)代入式(4)和式(5),可得:

$$\Phi(x_2) = A_1 \sin(px_2) + A_2 \cos(px_2) \quad (8)$$

$$\Psi(x_2) = B_1 \sin(qx_2) + B_2 \cos(qx_2) \quad (9)$$

式中, $p^2 = \omega^2/c_L^2 - k^2$ , $q^2 = \omega^2/c_T^2 - k^2$ 。因此,位移分量可以得出:

$$u_1 = \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} + \frac{\partial \psi_z}{\partial x_2} = ik\Phi + \frac{d\Psi}{dx_2} \quad (10)$$

$$u_2 = \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi_z}{\partial x_1} = \frac{d\Phi}{dx_2} - ik\Psi$$

根据胡克定律,应力分量可以得出:

$$\begin{aligned} \tau_{21} &= \mu \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) \\ &= \mu \left( 2ik \frac{d\Phi}{dx_2} + k^2 \Psi + \frac{d^2 \Psi}{dx_2^2} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \tau_{22} &= \lambda \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) + 2\mu \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \\ &= \lambda \left( -k^2 \Phi + \frac{d^2 \Phi}{dx_2^2} \right) + 2\mu \left( \frac{d^2 \Phi}{dx_2^2} - ik \frac{d\Psi}{dx_2} \right) \end{aligned}$$

频率方程即表示频率 $\omega$ 和波数 $k$ 的关系,可从边界条件得到。对于自由边界,在 $x = \pm h$ 时,有

$$\tau_{21} = \tau_{22} = 0 \quad (12)$$

联立式(8)-式(12),可以得到两个关于 $A$ 和 $B$ 的齐次方程,由于方程是齐次的,其系数行列式必须为零。因此可以得出兰姆波的频散关系:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} + \left[ \frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \right]^{\pm 1} = 0 \quad (13)$$

当式中为“+”时,则代表对称波型;为“-”时,则代表反对称波型。因此,通过求解式(13)可以得出频率 $\omega = 2\pi f$ 和相速度 $c_p$ 的关系,而且群速度 $c_g$ 可以表示为:

$$c_g = c_p^2 \left[ c_p - (fd) \frac{d(c_p)}{d(fd)} \right]^{-1} \quad (14)$$

联立式(13)和式(14)进行数值求解,可以得到兰姆

波的频散关系.应用表1的材料参数,可以得出PLA平板的群速度曲线如图1所示,兰姆波存在多种模式,比如A0、A1、A2和A3模式.相比A0模式,在A1、A2和A3模式下其群速度变化幅度大,因此难以利用A1、A2和A3模式的波有效地识别损伤信息.选取合适中心频率的A0模式兰姆波更有利于损伤识别.显然,对于A0模式,存在一个曲线相对平稳的频段,如图1中虚线所示.因此,在此频段中选择250kHz作为激励的中心频率进行仿真和实验.

表1 PLA平板的几何和材料参数  
Table 1 Parameters of the PLA plates

Parameter	Geometrical dimensions (unit: mm)			Material		
	<i>e</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>E</i>	$\rho$	$\mu$
A semi-finite plate	50	20	4	2966Mpa	$1.25 \times 10^{-9}t/mm^3$	0.33
A finite plate	100	100	4			

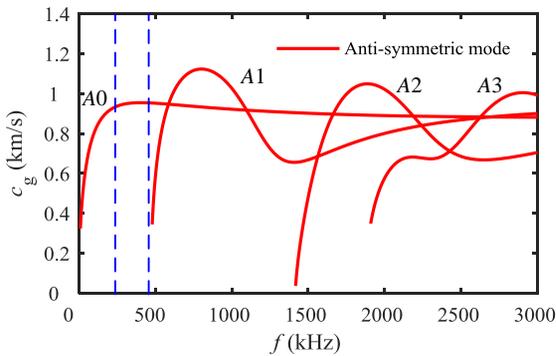
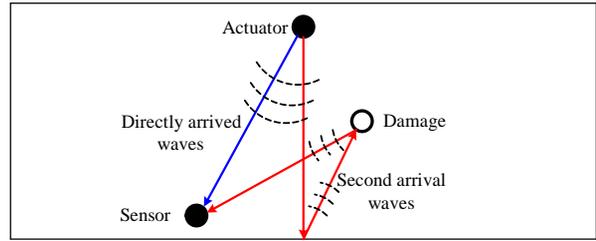


图1 PLA平板的群速度曲线

Fig.1 Group velocity curves of PLA plate

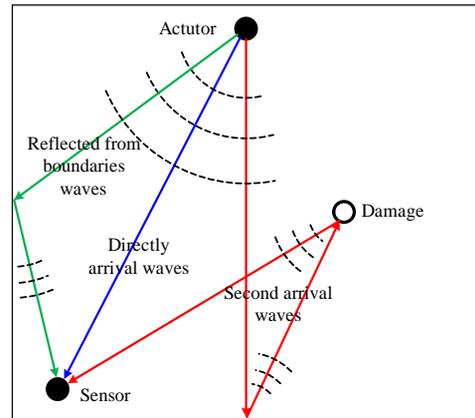
## 2 基于二次到达波的缺陷检测方法

兰姆波在半有限板中的多个传播路径如图2(a)所示.作动器(压电片)输出激励兰姆波信号,传感器(压电片)接收兰姆波信号.当平板内存在缺陷时,传感器接收的兰姆波信号可以分为两种:(1)初始到达波:激励信号直接传播到传感器的信号;(2)二次到达波:入射波经过底边反射到损伤再反射被传感器接收的信号.从图中可以看出,初始到达波不含有损伤信息,二次到达波携带损伤信息.兰姆波在有限板中的多个传播路径如图2(b)所示,传感器接收的兰姆波可以分为三种:(1)初始到达波:入射波直接被传感器接收;(2)边界反射波:入射波经过侧面边界反射被传感器接收;(3)二次到达波:入射波经过底边反射到损伤再反射被传感器接收.



(a)兰姆波在半有限板中的波传播路径

(a) Propagation characteristics of Lamb waves in a semi-finite plate



(b)兰姆波在有限板中的波传播路径

(b) Propagation characteristics of Lamb waves in a finite plate

图2 波传播路径

Fig.2 Propagation characteristics of waves

如图3所示,将三个压电片分别作为作动器和两个传感器安装在平板上,通过时域中的损伤信号来定位缺陷.

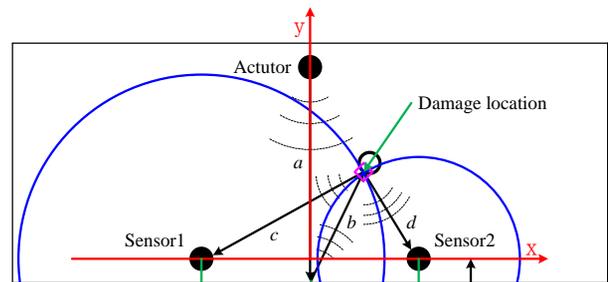


图3 缺陷定位示意图

Fig.3 Damage location principle

假设增材制造平板中有一个未知位置的缺陷,且作动器和两个传感器的位置固定.兰姆波传播的速度可以由图1确定,假设二次到达波被传感器接收前的传播时间为 $t$ , $L$ 为二次到达波传播路径的总长.对于不同的传感器,其对应的二次到达波的路径总长可以表示为:

$$\begin{cases} L_1 = vt_1 \\ L_2 = vt_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $L_1$  和  $L_2$  分别是二次到达波从作动器传播到传感器的总距离,  $t_1$  和  $t_2$  分别是其对应的时间. 根据图 3 所示的波传播路径的几何关系, 可以得出:

$$\begin{cases} L_1 = a + b + c \\ L_2 = a + b + d \end{cases} \quad (16)$$

联立式(15)和式(16), 可以得出:

$$\begin{cases} vt_1 = a + b + c \\ vt_2 = a + b + d \end{cases} \quad (17)$$

建立直角坐标系如图 3 所示, 假设未知缺陷位置为  $(x, y)$ ,  $a$  为作动器到底边的距离,  $b = \sqrt{x^2 + (y + n)^2}$ ,  $c = \sqrt{(x + m)^2 + y^2}$ ,  $d = \sqrt{(m - x)^2 + y^2}$ , 可以看出,  $b$ 、 $c$  和  $d$  中仅仅含有  $x$  和  $y$  两个未知数. 将  $b$ 、 $c$  和  $d$  代入式(17), 即可求出  $x$  和  $y$ , 从而确定缺陷的位置. 假设缺陷到两个传感器的距离分别为  $r_1$  和  $r_2$ , 结合图 3 可以发现  $r_1 = c$  和  $r_2 = d$ , 因此有:

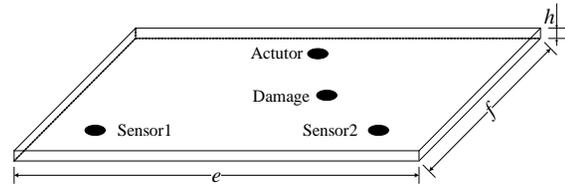
$$\begin{cases} r_1 = vt_1 - a - b \\ r_2 = vt_2 - a - b \end{cases} \quad (18)$$

求出  $r_1$  和  $r_2$ , 然后以两个传感器为圆心,  $r_1$  和  $r_2$  为半径做圆, 两个圆在平板内相交的点即缺陷定位所在, 如图 3 所示.

### 3 数值仿真

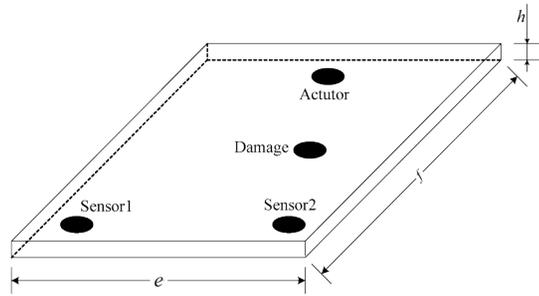
为了验证所设计方法的有效性, 本节进行了相应的有限元数值模拟. 分别建立 PLA 半有限平板和有限平板如图 4 所示, 相应的几何尺寸见表 1 所示. 在有限元模拟中, 由于模型为矩形平板, 因此网格尺寸为全局尺寸 0.2mm, 计算步长为 0.1ms, 缺陷类型为 1mm 通孔缺陷, 激励形式为力激励, 激励信号<sup>[16]</sup>由下式给出:

$$F(t) = \left(1 - \cos \frac{2\pi ft}{N}\right) \sin 2\pi ft \quad (19)$$



(a) 半有限平板

(a) A semi-finite plate



(b) 有限平板

(b) A finite plate

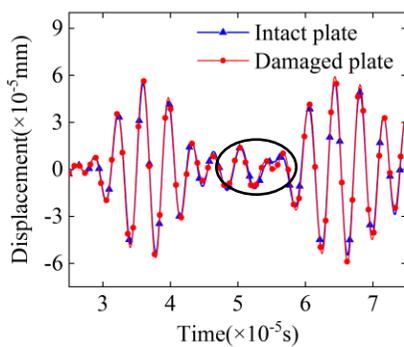
图 4 PLA 平板

Fig.4 PLA plate

式中,  $N=5$  是波峰数,  $f$  是中心频率,  $t=0.02\text{ms}$  是激励信号的持续时间.

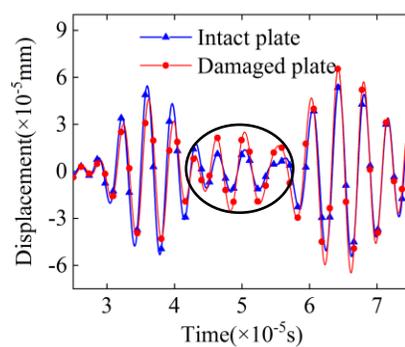
#### 3.1 半有限平板的数值仿真

半有限平板上的作动器和传感器位置如图 4 (a) 所示. 分别建立无损平板和缺陷平板的有限元模型, 它们的尺寸、材料完全一致, 是否存在缺陷是唯一的差别. 通过对比无损平板和缺陷平板的接收信号来确定缺陷位置. 无损平板和缺陷平板上的传感器 1 和传感器 2 接收到的信号分别进行对比, 如图 5(a) 和 5(b) 所示. 可以发现无损平板和缺陷平板的波形曲线几乎一致, 仅在黑色圆圈标注的地方出现了细微的不同, 这些不同是由于缺陷平板中缺



(a) 传感器 1 接收的信号

(a) Wave signal received by sensor 1



(b) 传感器 2 接收的信号

(b) Wave signal received by sensor 2

图 5 半有限平板上的波信号

Fig.5 Wave signal in a semi-finite plate

陷的反射导致的.为了更清楚地观察出缺陷对信号的影响,将缺陷平板的信号和无损平板的信号相减

并求绝对值,传感器1和传感器2的结果分别如图6(a)和6(b)所示.

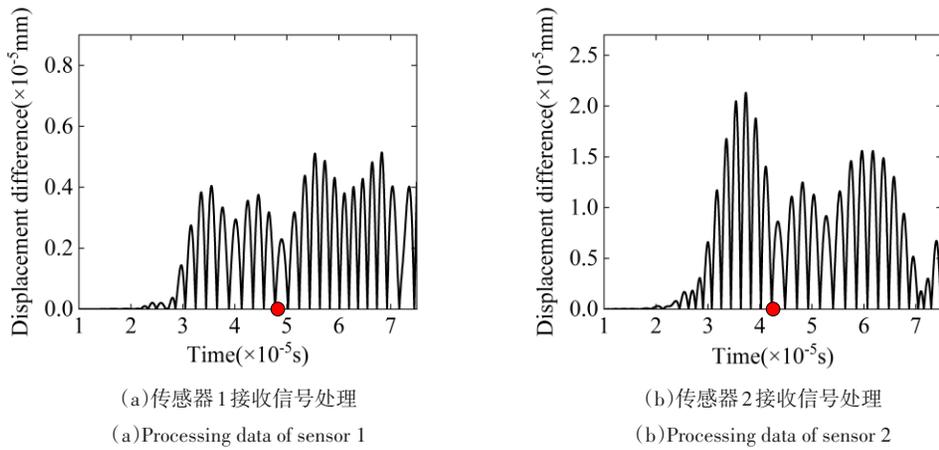


图6 半有限平板仿真结果处理

Fig.6 Results processing of simulation of a semi-finite plate

如图6所示,二次到达波经过缺陷反射后被传感器接收的时刻用红点标记,因此激励信号从作动器分别经过传播和反射到达传感器1和传感器2需要的时间为 $t_1=4.8\times 10^{-5}$ s和 $t_2=4.2\times 10^{-5}$ s.兰姆波在PLA平板上的传播速度为 $v=944.46$ m/s,而且 $a=18$ mm和 $b=10.31$ mm.因此,根据式(18)即可求出缺陷到传感器之间的直线距离 $r_1=17.03$ mm, $r_2=11.36$ mm.分别以传感器1和传感器2为圆心, $r_1$ 和 $r_2$ 为半径作圆,两圆在平板上的交点即为缺陷的位置,如图7中粉色矩形框标注所示.将半有限平板的短边长定义为 $s_1$ ,将仿真定位得到的缺陷位置与实际缺陷位置的直线距离定义为 $s_2$ ,将 $s_2/s_1$ 定义为缺陷定位的误差.对于半有限平板,缺陷定位误差为12.11%.

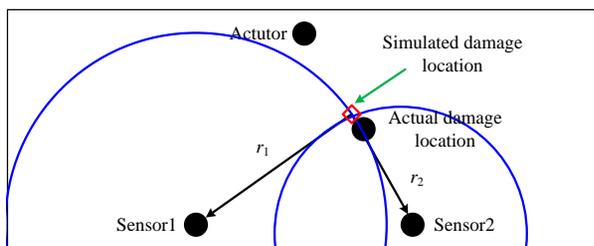


图7 半有限平板数值仿真损伤定位

Fig.7 Damage location of PLA semi-finite plate for numerical simulation

### 3.2 有限平板的数值仿真

PLA有限平板结构如图4(b)所示,类似于半有限平板,激励信号经过传播和反射最终被传感器1和传感器2接收.传感器1和传感器2接收到的无

损平板和缺陷平板的信号分别如图8(a)和8(b)所示.将图8中黑色圆圈标记的部分信号放大,如图9所示,在图9中,黑色矩形标注的部分可以明显看出无损平板和缺陷平板之间的信号差异.

相比于半有限板,有限平板采取同样的信号处理方法,将无损平板的信号和缺陷平板的信号作差并求绝对值,如图10(a)和10(b)所示.红点标记的时刻即二次到达波在有限平板中传播的时间,它们分别为 $t_1=2.14\times 10^{-4}$ s和 $t_2=1.95\times 10^{-4}$ s,兰姆波在有限平板中的传播速度和半有限平板相同,为 $v=944.46$ m/s.而且,在有限平板中, $a=90$ mm和 $b=50.99$ mm.根据式(18),有限平板内缺陷到传感器1和传感器2的直线距离 $r_1=60.22$ mm和 $r_2=43.18$ mm.分别以传感器1和传感器2为圆心, $r_1$ 和 $r_2$ 为半径作圆,两圆在有限平板上的交点即为缺陷位置,定位原理如图7半有限平板所示.对于有限平板,其定位误差为10.22%.

## 4 实验验证

### 4.1 实验装置

实验试件为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 4\text{mm}$ 的PLA有限平板,图11(a)和图11(b)分别表示PLA有限平板的示意图和实物照片.将四个直径为9.2mm、厚度为1.8mm的压电片使用环氧树脂粘贴在PLA有限平板上,用于信号的激励和接收.在缺陷平板上设置直径为1mm的通孔缺陷,如图11(b)所示.表2列出了有限平板上压电片和缺陷实际位置在图11

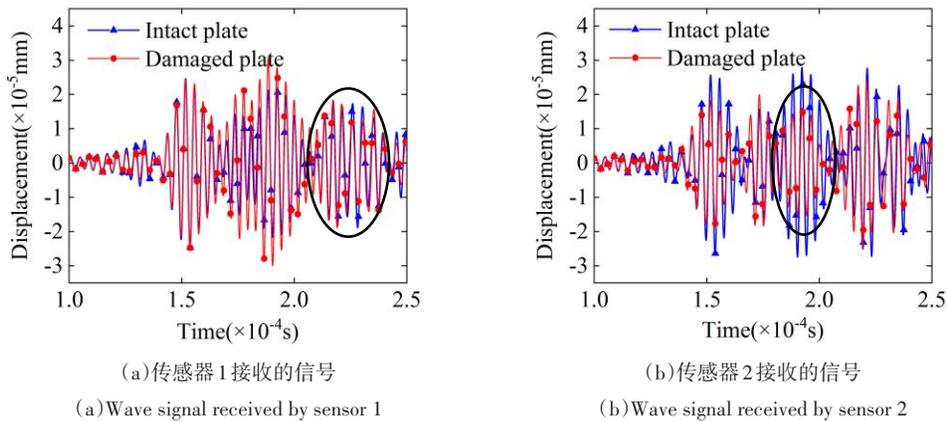


图 8 有限平板上的波信号  
Fig.8 Wave signal in a finite plate

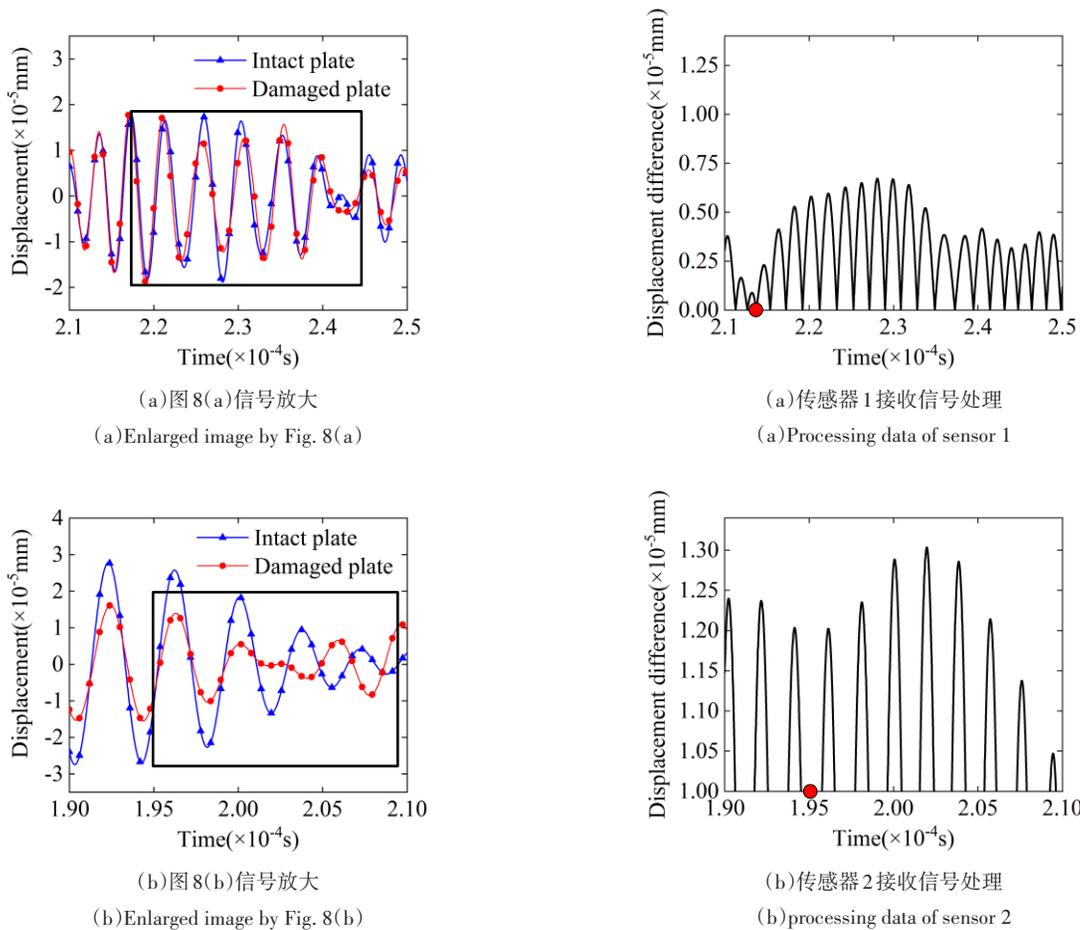


图 9 有限平板局部信号放大  
Fig.9 Enlarged image of a finite plate

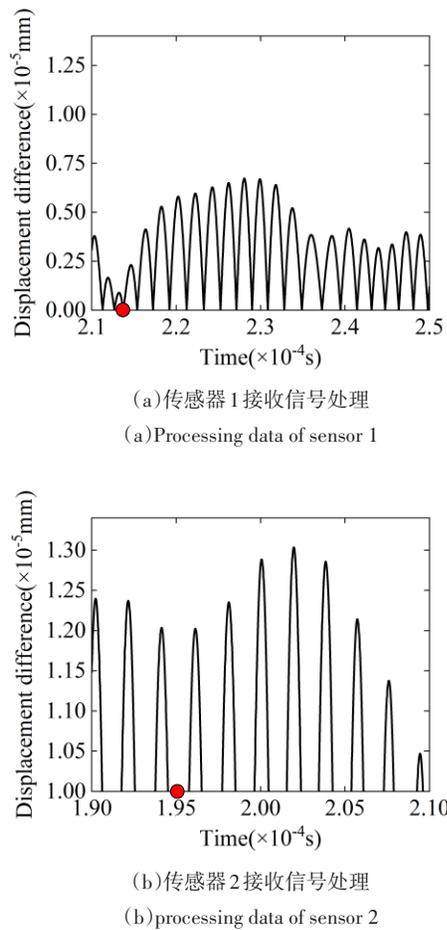


图 10 有限平板仿真结果处理  
Fig. 10 Results processing of simulation of a finite plate

(a)中所建立坐标系中的坐标信息.

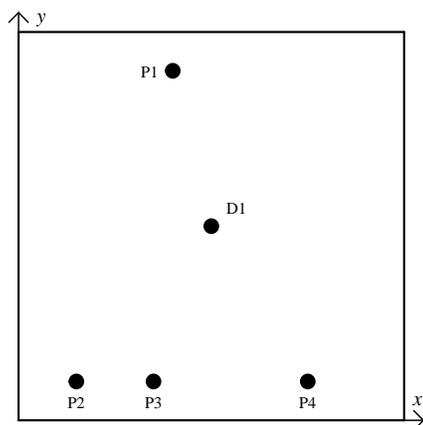
实验装置如图 12 所示,通过 Ritec Advanced Measurement System (RAM-5000)输出具有中心频率为 250kHz 和五个波峰并经汉宁窗调制的正弦信号.然后,将产生的信号输出到作动器(压电片 P1)

上,信号同时经由数字荧光示波器(Tektronix DPO 3014)显示.作动器将电信号转换成振动信号在 PLA 平板上传播,被其它作为传感器的压电片(P2, P3和 P4)接收,其将振动信号转换回电信号并且经由示波器显示.最后,通过示波器收集实验数据并

表2 压电片和缺陷具体位置

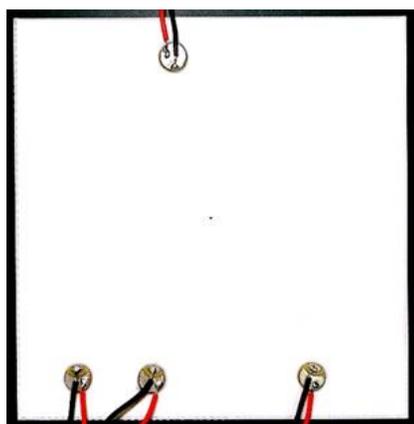
Table 2 Locations of the piezoelectric wafers and the damage

Type	Point no.	Coordinates	
		x (mm)	y (mm)
Piezoelectric wafers	P1	40	90
	P2	15	10
	P3	35	10
	P4	75	10
Damage	D1	50	50



(a)示意图

(a) Diagram



(b)实物照片

(b) Actual photo

图11 PLA有限平板

Fig.11 PLA finite plate

且进行信号处理以对缺陷进行定位.

#### 4.2 信号处理和分析

将压电片 P2、P3 和 P4 分别命名为传感器 1、传感器 2 和传感器 3. 传感器 1 接收到的信号如图 13 所示, 其包含无损平板和缺陷平板的不同信号. 为了对比无损平板和缺陷平板接收到的信号, 在实验中使用完全相同的激励源. 图 13(a) 描绘了无损平板和缺陷平板上传感器 1 接收到的信号, 蓝色信号

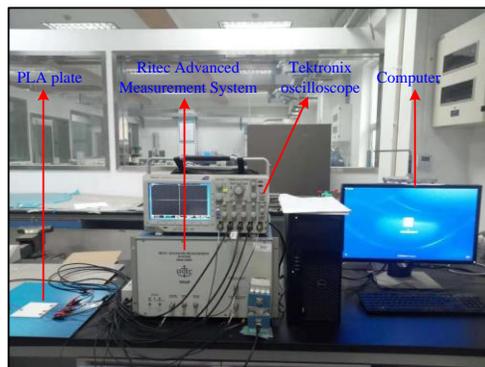


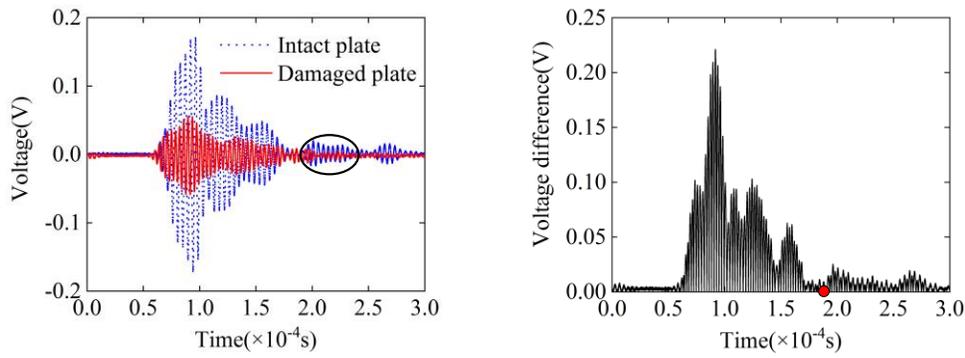
图12 PLA有限平板缺陷检测的实验装置

Fig.12 Experimental actual setup for the damage location of a finite plates

代表无损平板信号, 红色信号代表缺陷平板信号. 观察可知, 无损平板信号和缺陷平板信号曲线形状相似, 但其幅值不同, 这是因为在实验中不能忽略激励信号经过缺陷的反射现象, 如图 2(b) 所示, 缺陷反射波将抵消并削弱激励信号, 因为无损平板上没有缺陷, 因此其信号幅值大于缺陷平板.

经过仔细的对比, 发现在如图 13(a) 中黑色圆圈标注处检测到二次到达波. 为了更清楚地观察二次到达波被传感器 1 检测到的时刻, 对无损平板信号和缺陷平板信号作差并求绝对值, 如图 13(b) 所示. 根据第 3 节的分析方法, 可以清楚地看到二次到达波被传感器 1 接收的时刻, 即图中红点所示. 图 14 和图 15 分别表示传感器 2 和传感器 3 的接收信号, 二次到达波被检测到分别如图 14(a) 和图 15(a) 中黑色圆圈所示, 二次到达波从作动器经过传播反射被传感器接收的时刻分别如图 14(b) 和图 15(b) 中的红点所示.

为了验证数值仿真的有效性, 本节选择两个压电片 (传感器 2 和传感器 3) 作为信号接收器进行缺陷检测. 与仿真分析一样, 实验通过识别二次到达波的传播时间进行反求缺陷和传感器之间的直线距离进行缺陷定位. 观察图 14(b) 和 15(b), 发现二次到达波传播到传感器 2 和传感器 3 的时间分别为  $t_{\text{sensor } 2} = 1.87 \times 10^{-4} \text{ s}$  和  $t_{\text{sensor } 3} = 1.95 \times 10^{-4} \text{ s}$ . 兰姆波在实际的 PLA 有限平板上的传播速度为 944.46 m/s. 因此, 实验表明传感器 2 和传感器 3 与缺陷之间的直线距离分别为  $r_{\text{sensor } 2} = 35.62 \text{ mm}$  和  $r_{\text{sensor } 3} = 43.18 \text{ mm}$ . 分别以传感器 2 和传感器 3 为圆心,  $r_{\text{sensor } 2}$  和  $r_{\text{sensor } 3}$  为半径作圆, 两圆在平板上的交点即为实验检测的缺陷位置. 对于实验 PLA 有限平板, 定位误差为 9.99%.

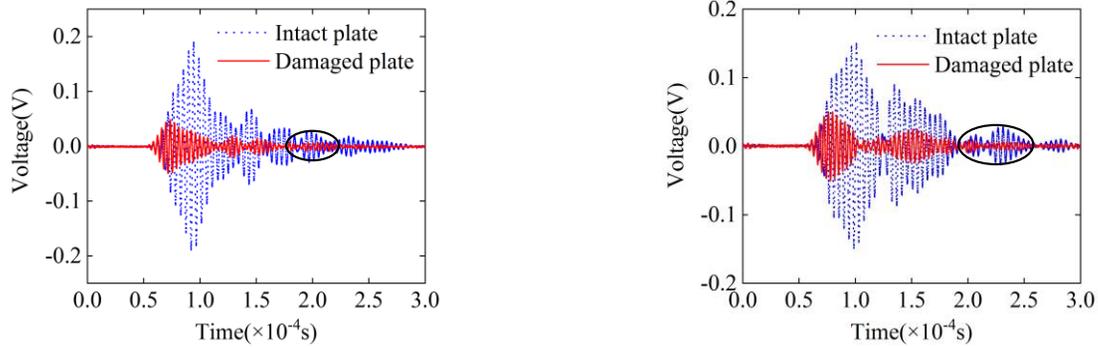


(a) 无损平板和缺陷平板的信号对比  
 (a) The comparison of the signals on the intact plate and the damaged plate

(b) 信号处理  
 (b) Signals processing

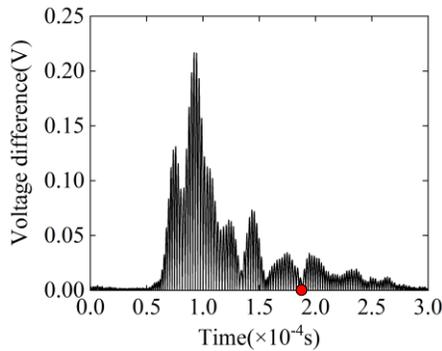
图 13 传感器 1 接收信号和信号处理

Fig. 13 Signals received by sensor 1 and signals processing



(a) 无损平板和缺陷平板的信号对比  
 (a) The comparison of the signals on the intact plate and the damaged plate

(a) 无损平板和缺陷平板的信号对比  
 (a) The comparison of the signals on the intact plate and the damaged plate



(b) 信号处理  
 (b) signals processing

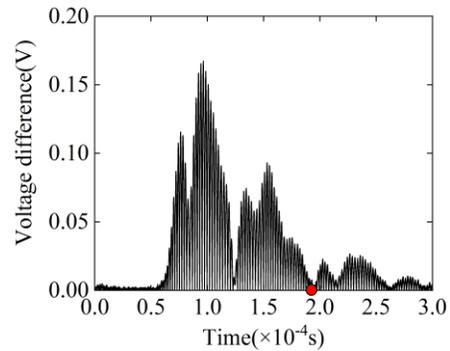


图 15 传感器 3 接收信号和信号处理

Fig. 15 Signals received by sensor 3 and signals processing

### 5 结论

兰姆波在平板中传播过程具有多个传播路径,其中二次到达波携带缺陷信息.本文提出了一种利

用多个传播路径中的二次到达波定位增材制造平板缺陷的无损检测方法.为了避免兰姆波多个模式的干扰,研究了相应的频散特性,根据频散特性选取了合适的激励中心频率.通过数值模拟研究了半

有限平板和有限平板中的直径仅为1mm通孔缺陷的无损检测,结果表明数值仿真定位的缺陷位置和实际缺陷的位置误差大约为12.11%和10.22%。通过实验对PLA有限平板中的直径1mm的通孔缺陷进行定位,检测到的缺陷位置和实际缺陷的位置误差为9.99%。该方法在误差可接受的范围内实现了小缺陷的简单快速定位,在航天航空等领域,对增材制平板类结构无损检测具有一定的指导意义。

### 参 考 文 献

- 1 李建康,张春利,解辛辛.板类结构动力检测与控制中的一种新方法.动力学与控制学报,2005,3(3):73~77(Li J K, Zhang C L, Xie X X. A new approach for dynamic damage detection and control of plate-like structure. *Journal of Dynamics and Control*, 2005, 3(3):73~77(in Chinese))
- 2 程长明,彭志科,孟光.基于NARMAX模型和NOFRF结构损伤检测的实验研究.动力学与控制学报,2013,11(1):89~96(Cheng C M, Peng Z K, Meng G. The experimental study of damage detection based on NARMAX model and NOFRF. *Journal of Dynamics and Control*, 2013, 11(1):89~96(in Chinese))
- 3 任凯,张子涵,杜飞,等.基于阻抗法的多螺栓连接预紧扭矩检测试验研究.动力学与控制学报,2018,16(5):467~472(Ren K, Zhang Z H, Du F, et al. Experimental study on multi-bolt connection pre-tightening torque testing based on impedance method. *Journal of Dynamics and Control*, 2018, 16(5):467~472(in Chinese))
- 4 焦敬品,李立,马百义,等.基于超声局部谐振的板结构缺陷定量检测方法.仪器仪表学报,2019,40(12):1~8(Jiao J P, Li L, Ma B Y, et al. Quantitative detection method of plate structure defects based on ultrasonic local resonance. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(12):1~8(in Chinese))
- 5 Yu L, Giurgiutiu V. In situ 2-D piezoelectric wafer active sensors arrays for guided wave damage detection. *Ultrasonics*, 2008, 48(2):117~134
- 6 Clarke T, Cawley P, Wilcox P D, et al. Evaluation of the damage detection capability of a sparse-array guided-wave SHM system applied to a complex structure under varying thermal conditions. *IEEE transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2009, 56(12):2666~2678
- 7 Rose J L. A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2002, 124(3):273~282
- 8 Chimenti D E, Martin R W. Nondestructive evaluation of composite laminates by leaky Lamb waves. *Ultrasonics*, 1991, 29(1):13~21
- 9 He J, Leckey C A C, Leser P E, et al. Multi-mode reverse time migration damage imaging using ultrasonic guided waves. *Ultrasonics*, 2019, 94:319~331
- 10 Park I, Jun Y, Lee U. Lamb wave mode decomposition for structural health monitoring. *Wave Motion*, 2014, 51(2):335~347
- 11 徐敬岗,邓景珊,李书齐.兰姆波检测参数曲线的应用研究.声学技术,2020,39(5):574~580(Xu J G, Deng J S, Li S Q. Study on the application of detection parameter curves related to Lamb wave inspection. *Technical Acoustics*, 2020, 39(5):574~580(in Chinese))
- 12 Michaels T E, Michaels J E, Ruzzene M. Frequency-wave-number domain analysis of guided wavefields. *Ultrasonics*, 2011, 51(4):452~466
- 13 Wang L, Yuan F G. Group velocity and characteristic wave curves of Lamb waves in composites: Modeling and experiments. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(7):1370~1384
- 14 Lee B C, Staszewski W J. Modelling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: Part I. Wave propagation. *Smart Materials and Structures*, 2003, 12(5):804~814
- 15 Lee B C, Staszewski W J. Modelling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: Part II. Wave interactions with damage. *Smart Materials and Structures*, 2003, 12(5):815~824
- 16 Baskaran G, Rao C L, Balasubramaniam K. Simulation of the TOFD technique using the finite element method. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2007, 49(11):641~646
- 17 Kessler S S, Spearing S M, Soutis C. Damage detection in composite materials using Lamb wave methods. *Smart materials and Structures*, 2002, 11(2):269~278
- 18 Michaels J E. Detection, localization and characterization of damage in plates with an in situ array of spatially distributed ultrasonic sensors. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(3):035035
- 19 Zhu R, Huang G L, Yuan F G. Fast damage imaging using the time-reversal technique in the frequency-wavenumber domain. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(7):075028
- 20 Kim H W, Yuan F G. Enhanced damage imaging of a metallic plate using matching pursuit algorithm with multiple wavepaths. *Ultrasonics*, 2018, 89:84~101
- 21 Hall J S, Michaels J E. Multipath ultrasonic guided wave imaging in complex structures. *Structural Health Monitoring*, 2015, 14(4):345~358

- 22 Ebrahimkhanlou A, Dubuc B, Salamone S. Damage localization in metallic plate structures using edge-reflected lamb waves. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(8): 085035
- 23 Cerniglia D, Montinaro N. Defect detection in additively manufactured components: laser ultrasound and laser thermography comparison. *Procedia Structural Integrity*, 2018, 8:154~162
- 24 Waller J M, Parker B H, Hodges K L, et al. Nondestructive evaluation of additive manufacturing. *National Aeronautics and Space Administration*, 2014
- 25 Ahsan M N, Bradley R, Pinkerton A J. Microcomputed tomography analysis of intralayer porosity generation in laser direct metal deposition and its causes. *Journal of Laser Applications*, 2011, 23(2):022009
- 26 Achenbach J. Wave propagation in elastic solids. Elsevier, 2012

## DAMAGE DETECTION IN THE ADDITIVE MANUFACTURING PLATE USING THE SECOND ARRIVAL WAVE \*

Tan Dongguo Zhou Jiayi<sup>†</sup> Wang Kai Xu Daolin

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract** Usually, only the first arrival wave is used for damage detection, and the resultant overlap of multiple wavepaths is ignored. In this paper, a simple damage detection method using the second arrival waves of multiple wavepaths is proposed for damage localization in an additive manufacturing (AM) plate. The frequency and mode of Lamb wave used for excitation are determined according to the dispersion characteristics. The wavepaths of Lamb wave propagation in the plate are designed for receiving the second arrival waves by a sparsely distributed sensor array. The distance from the sensor to the damage is calculated by multiplying the wave velocity by the consuming time. Then, the damage location can be determined by intersecting any two circles taking the sensor as the center and the calculated distance as the radius. Both numerical simulations and experiments of AM polylactide acid (PLA) plates are carried out to validate this method, which indicates that a through-hole damage with diameter of 1mm can be detected with acceptable accuracy in a simple way. The results also confirm that the second arrival waves of multiple wavepaths can be used to detect the damage with only three piezoelectric wafers. In addition, both the effects of the damage size and depth on the accuracy of the proposed method are studied by numerical simulations.

**Key words** damage detection, Lamb wave, second arrival wave, multiple wavepaths, additive manufacturing

---

Received 9 March 2021, Revised 21 April 2021.

\* The project supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB1102801)

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: jxizhou@hnu.edu.cn