

## 相移迁移法在激光超声合成孔径聚焦技术中的应用

陈楚<sup>1</sup>, 应恺宁<sup>1</sup>, 刘念<sup>1</sup>, 戴鹭楠<sup>2</sup>, 阚威威<sup>2\*\*</sup>, 倪辰荫<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

<sup>2</sup>南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 通过分析脉冲源激光辐照于工件表面激发的多模式、宽带超声体波信号并结合合成孔径聚焦技术(SAFT), 实现了对工件内部微小缺陷的检测、定位和成像。首先基于有限元仿真模拟了激光激发超声波在含缺陷样品中的传播过程, 编写了基于相移迁移法(PSM)的 SAFT 成像算法, 然后在实验中使用激光在含缺陷样品表面激发超声波, 使用激光测振仪探测超声波, 并基于已有算法和探测结果对样品内缺陷进行了检测和定位, 以验证算法的正确性。有限元仿真以及实验结果均表明, 将激光超声技术与频域 SAFT-PSM 结合, 能够有效地对微小缺陷进行检测和定位, 且其图像重构速度快于时域 SAFT, 可为激光超声无损检测提供更快速的实时技术方案。

**关键词** 传感器; 激光超声; 合成孔径聚焦技术; 相移迁移法; 成像算法; 无损检测

中图分类号 TG115.28

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0304001

### 1 引言

工业领域中, 对不同材料工件的加工或长期使用工件均有可能使得工件表面、内部产生不同种类的缺陷, 从而会影响其使用期限。对于工件表面的裂纹、磨损等缺陷, 可使用基于光学原理的人工观测法、激光扫描法<sup>[1]</sup>、视觉设备采集缺陷光学图像<sup>[2]</sup>等方法<sup>[3-4]</sup>对其进行检测。对于金属材料工件而言, 其不透光的性质导致难以通过纯光学手段获取其内部缺陷信息。声波具有可穿透金属材料的性质, 使得超声无损检测技术被广泛应用于金属工件内部缺陷的检测、定位、尺寸确定, 该技术可对超声探测信号进行二次处理, 还可对缺陷进行二维、三维成像<sup>[5]</sup>。然而传统超声换能器的探头尺寸有限, 可能导致超声波在物体内部存在声束扩散的现象, 从而使得所成图像的横向分辨率降低<sup>[6-8]</sup>。合成孔径聚焦技术(SAFT)<sup>[5-26]</sup>作为一种超声信号后处理方法, 可用于解决上述的成像问题。具体地, 使用单个小孔径换能器扫查或多个小孔径换能器同时激发、探测的方式研究物体内部的超声波, 该过程可等效为大孔径传感器的激发和探测。这一方法不仅可克服大孔径

换能器在制作工艺上的困难, 还可借助逐点聚焦提高横向分辨率。SAFT 算法可分为时域算法<sup>[6-7,12]</sup>和频域算法<sup>[8,13-27]</sup>两大部分。时域 SAFT 算法大多是基于延时叠加和全范围动态聚焦原理, 易于理解, 仅通过简单的累计求和便可获得分辨率较高的成像结果。然而时域 SAFT 算法在成像过程中存在大量的循环计算, 耗时较长, 在数据量大时较难满足实际应用需求<sup>[25]</sup>。

相比之下, 频域 SAFT 算法的计算速度更快, 这一方法最初是由波动方程推导而来, 被称为波数算法<sup>[13]</sup>。基于现有的频域 SAFT 算法已发展出了许多不同的算法, 包括  $\omega-k$  算法<sup>[14]</sup>、衍射理论角谱法<sup>[15]</sup>、相移迁移法(PSM)<sup>[16]</sup>等。 $\omega-k$  算法<sup>[14]</sup>的计算效率远高于时域算法, 其要求传播介质的波速恒定, 因此被引入超声成像领域。随后, 基于波前分析的衍射理论角谱法也被引入, 该算法可从单频和多频的角度对图像进行重构, 广泛利用了时间域和空间域的傅里叶变换, 可实现对物体的三维成像<sup>[15]</sup>。近年来, 自动化在线检测中常使用超声换能器结合水浸法来改善检测分辨率较低和探头耦合的问题, 而超声波在水中的声速与在检测物质中的声速具有

收稿日期: 2020-07-24; 修回日期: 2020-08-25; 录用日期: 2020-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(11974186, 61975080)

\*E-mail: chenying.ni@njust.edu.cn; \*\*E-mail: kan@njust.edu.cn

差异性,为此地震学中的相移迁移技术<sup>[14]</sup>被引入水浸超声成像领域。该方法可对浸没在水中且带有侧面钻孔的铜块和带有点状凹陷的铝块进行成像<sup>[17-18]</sup>,这证实了相移迁移技术在水浸式超声成像中的可行性。若进一步将相移迁移技术与虚拟传感器相结合,则可避免平面探头传感器探测导致的成像过校正问题,获得信噪比更高的水浸物体成像图<sup>[19]</sup>。

上述频域 SAFT 算法均结合了超声换能器对物体或物体内部、外部缺陷进行探测成像。与超声换能器不同,激光超声是利用激光直接照射样品来产生超声的一种方式,属于非接触式激发。传统的激光超声无损检测方法包括脉冲回波法、投捕法<sup>[20]</sup>、时间飞行散射法(TOFD)<sup>[21-22]</sup>,在利用这些激光超声无损检测技术进行检测时,由于激光激发超声波具有多模式的性质,因此首先需要对时域信号进行模式分析<sup>[23]</sup>,当确认了声波模式后才能准确地对信号进行再次分析以获得缺陷的相关信息。频域 SAFT 算法利用傅里叶变换从频率的角度对所探测信号进行反演成像,若将频域 SAFT 算法与激光超声相结合,则无需再从时域信号中对波的模式进行判断,目前已有关于激光超声与衍射理论角谱法相结合的报道。该方法可对不锈钢板中的夹杂、应力腐蚀裂纹<sup>[24]</sup>以及弯曲界面的分层进行超声图像的重建<sup>[25-26]</sup>,通过使用反卷积法提高图像的纵向和横向分辨率,并在频率域控制成像孔径,再对数据进行

空间插值,从而提高了计算效率,得到较好的成像结果。后期该算法还被应用于其他工业器件、复杂结构的探测成像<sup>[27]</sup>。由反射地震学引入的相移迁移法作为一种新兴算法已结合传统超声换能器获得了较好的成果,具有潜在的应用前景。但是到目前为止,尚未见将该方法与激光超声相结合的报道。

本文将激光超声与频域 SAFT 相移迁移法相结合,首先使用有限元模拟激光激发的超声波在带有缺陷的样品中传播的过程,并根据数值模拟结果编制了基于相移迁移法的合成孔径聚焦技术成像算法。为避免由激光激发的热膨胀信号和表面波信号对缺陷反射信号的影响,采用异点激发探测扫查的形式获取样品内部的超声信息。在实验中使用激光激发含缺陷样品表面,使用激光测振仪探测超声波,并基于已有算法和探测结果对样品内缺陷进行了检测和定位,从而验证了算法的正确性。此外,通过在图像重建过程中选择合适的频率范围,避免了低频噪声和低频噪声的影响并且缩短了重构时间,从而使后期实验中的实时成像成为可能。

## 2 相移迁移法原理

由惠更斯原理可知,当由样品表面开始向下传播的超声波遇到内部缺陷时,缺陷会以次级声源的形式向相反的方向辐射超声波并由换能器在相同点接收超声波,如图 1(a)所示。图中  $G$  和  $D$  为所研究的两点,分别为激发点和探测点。

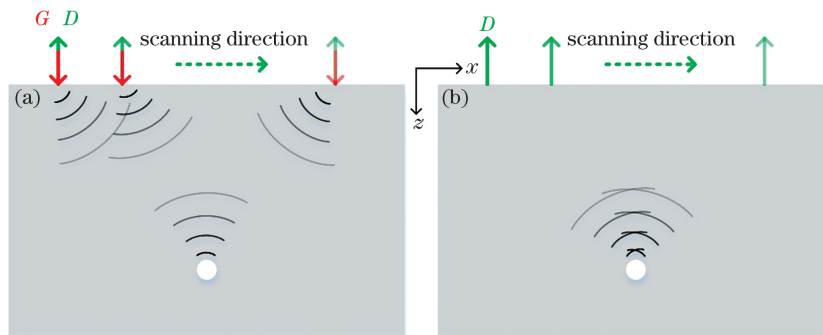


图 1 超声波成像模型。(a)传统超声波成像模型;(b)爆炸反射等效模型

Fig. 1 Ultrasonic imaging models. (a) Traditional ultrasonic imaging model; (b) explosion reflection equivalent model

相移迁移法基于二维波动方程。这一方法将缺陷视为一个声源,可将整个激发探测过程视为一个由缺陷向样品表面辐射超声波信号的过程,该过程亦被称为爆炸反射,如图 1(b)所示。为使得整个传播过程的时间与实际时间相对应,常使用样品中的实际波速的  $1/2$  替换实际波速  $c$ ,这里称该波速为等效波  $c_{eq}$ 。

$p(x, z, t)$  表示超声传播的任意检测  $(x, z)$  位置随时间  $t$  变化的声压力场,满足二维波动方程<sup>[28]</sup>:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c_{eq}^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) p(x, z, t) = 0, c_{eq} = \frac{c}{2}. \quad (1)$$

对(1)式中  $x, z, t$  进行傅里叶变换,得到

$$\left(-k_x^2 + k_z^2 + \frac{\omega^2}{c_{\text{eq}}^2}\right)P(k_x, k_z, \omega) = 0, \quad (2)$$

式中： $\omega$  为频率； $k_x, k_z$  分别为  $x, z$  方向的波数， $k_x = \alpha k, k_z = \gamma k, k$  为波数， $k = \frac{\omega}{c_{\text{eq}}}$ ， $\alpha$  和  $\gamma$  为  $x, z$  方向上的方向余弦； $P(k_x, k_z, \omega)$  为频率  $\omega$  下，声压场的二维傅里叶变换。在仅讨论(2)式的非平凡解的情况下  $P(k_x, k_z, \omega) \neq 0, k_x, k_z, \omega$  三者必定满足色散方程：

$$k_x^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{c_{\text{eq}}^2}. \quad (3)$$

使用  $k_x, \omega$  表示  $k_z$ ：

$$k_z^2 = \frac{\omega^2}{c_{\text{eq}}^2} - k_x^2. \quad (4)$$

再对(1)式中  $x, t$  进行傅里叶变换，得到

$$\left(-k_x^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c_{\text{eq}}^2}\right)P(k_x, z, \omega) = 0. \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式得

$$\left(k_z^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)P(k_x, z, \omega) = 0. \quad (6)$$

解该微分方程得

$$P(k_x, z, \omega) = P(k_x, z_0, \omega) \exp[ik_z(z - z_0)], \quad (7)$$

式中： $P(k_x, z_0, \omega)$  代表在样品表面获取的声场的二维傅里叶变换。

常将扫描平面定义为  $z_0 = 0$  平面，以便于后续公式的推导和计算。因此(7)式可写为

$$P(k_x, z, \omega) = P(k_x, z_0, \omega) \exp(ik_z z) = P(k_x, z_0, \omega) \exp\left(iz \sqrt{\frac{\omega^2}{c_{\text{eq}}^2} - k_x^2}\right). \quad (8)$$

由(8)式可知，其他  $z$  深度的声场的二维傅里叶变换形式可由测得的  $z_0$  平面声场的二维傅里叶变换形式乘上一个与  $k_x, z$  相关的相移因子得到。

对(8)式中  $k_x, \omega$  进行二维傅里叶逆变换，可得

$$p(x, z, t) =$$

$$\iint P(k_x, z, \omega) \exp(jk_x x) \exp(j\omega t) dk_x d\omega. \quad (9)$$

由上述推导可知，PSM 算法将缺陷设为一个声源，在  $t=0$  时应具有最强的响应，因此将  $t=0$  代入(9)式得

$$p(x, z, t=0) = \iint P(k_x, z, \omega) \exp(jk_x x) dk_x d\omega. \quad (10)$$

由(10)式可知其他深度的声场可由对  $k_x$  的一维傅里叶逆变换以及对频率  $\omega$  的简单积分求得。

本文采用激光激发超声波，为避免激光辐照样品表面产生的热膨胀区以及表面波信号对缺陷反射信号的影响，采用了异点探测，即激发、探测光源分离。但由于本文中激发点与探测点之间间距不大于  $200 \mu\text{m}$ ，远小于成像深度，在计算时可近似等效为同点激发同点探测，因此亦可将上述的爆炸反射模型应用于本文的激光超声成像中。

### 3 数值计算模型

#### 3.1 数值模型

为验证上述算法也可适用于异点激发探测点的激光超声，首先使用 Comsol Multiphysics 对激光激发超声、探测超声的实验方式进行了数值模拟和计算<sup>[7,29]</sup>。

首先在 Comsol Multiphysics 软件中选择固体力学以及固体传热模块，构建如图 2 所示的模型，模型材料设置为高强度钢；尺寸设置为：宽为  $x$  (mm)、高为  $z$  (mm)；模型内部  $z_1$  (mm) 深度设置一个直径为  $D_0$  (mm) 的圆形通孔缺陷。

如图 2 左上角的插图所示，在  $G$  点(图 2 插图

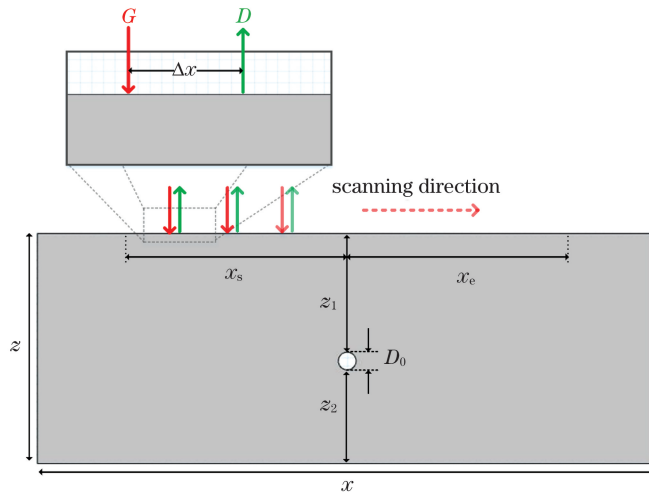


图 2 数值计算所用样品结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sample structure used in numerical calculation

中向下的箭头所示)处设置一个在时间空间上均呈高斯分布的热源以模拟脉冲激光入射模型表面并在局部区域迅速热膨胀、进而产生超声波的过程,脉冲激光的定义式为<sup>[30]</sup>

$$Q = \frac{E}{t_0 \pi r_0^2} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{r_0^2}\right] \cdot \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) \cdot \frac{t}{t_0}, \quad (11)$$

式中: $E$  为脉冲能量; $t_0$  为脉冲宽度; $r_0$  为光斑半径; $x_0$  为激光光斑中心位置。由于热膨胀区域的存在,本文将传统超声同点激发、探测的方式改为异点激发、探测,因此在距离  $G$  点右侧  $\Delta x$  位置处的  $D$  点获取超声波离面位移数据。等距离改变激发点位置,重复计算上述模型,并在每个模型的激发点右侧  $\Delta x$  处(图 2 中与向下箭头成对出现的向上箭头处)导出相应的激光超声离面位移数据。

随后将上述模型中的圆形缺陷取消,保持其他参数不变,重复计算相同组无圆形缺陷的模型。后期进行数据处理时可将相同激发探测位置的有缺陷数据和无缺陷数据作差,由于除缺陷的反射信号外其他信号一致,因此这一做法可在消除杂散波信号的同时凸显缺陷反射信号。

### 3.2 有限元数值计算参数设置及 B 扫结果

表 1~3 为有限元模拟中所选材料的属性、脉冲激光的参数以及模型基本结构参数。

表 1 高强度钢材料属性

Table 1 Material properties of high-strength steel

Parameter	Value
Thermal expansion coefficient /K <sup>-1</sup>	1.23×10 <sup>-5</sup>
Young's modulus /MPa	2.0×10 <sup>5</sup>
Poisson's ratio	0.30
Lamé constant λ / (N·m <sup>2</sup> )	1.5×10 <sup>11</sup>
Lamé constant μ / (N·m <sup>2</sup> )	7.5×10 <sup>10</sup>
Density / (kg·m <sup>-3</sup> )	7.85×10 <sup>3</sup>

表 2 脉冲激光参数

Table 2 Parameters of pulsed laser

Parameter	Value
Duration /ns	10
Spot radius /μm	50
Energy density / (J·m <sup>-2</sup> )	3.82×10 <sup>4</sup>

表 3 模型基本结构参数

Table 3 Basic structural parameters of model

Parameter	Value
Sample width $x$ /mm	7.00
Sample thickness $z$ /mm	2.60
Defect diameter $D_0$ /mm	0.20
Defect depth $z_1$ /mm	1.34
Excitation detection interval $\Delta x$ /mm	0.10

使用上文介绍的模型模拟了激光超声扫查的过程,扫查步长为 0.125 mm,扫查范围为 $[x_s, x_e]$ , $x_s = -2.5$  mm, $x_e = 2.5$  mm。

图 3(a)和图 3(b)分别为对有圆形缺陷和无圆形缺陷模型进行数值计算时所得时域 B-scan 图。

图 3 中,横轴表示时间,单位为 μs;纵轴表示激发点位置,单位为 mm。图中颜色代表激光激发超声波离面位移幅值。图 3(a)中各信号已用不同字母标出。A 为缺陷反射的横波信号;B 为缺陷反射的纵波信号;R 为直达声表面波信号;r-R 为由样品右壁反射的表面波信号;l-R 为由样品左壁反射的表面波信号。除由缺陷引起的 A 信号和 B 信号外,其余的 R 信号、l-R 信号和 r-R 信号均可于图 3(b)中观察到。

将有圆形缺陷和无圆形缺陷模型的数据作差,得到图 4。

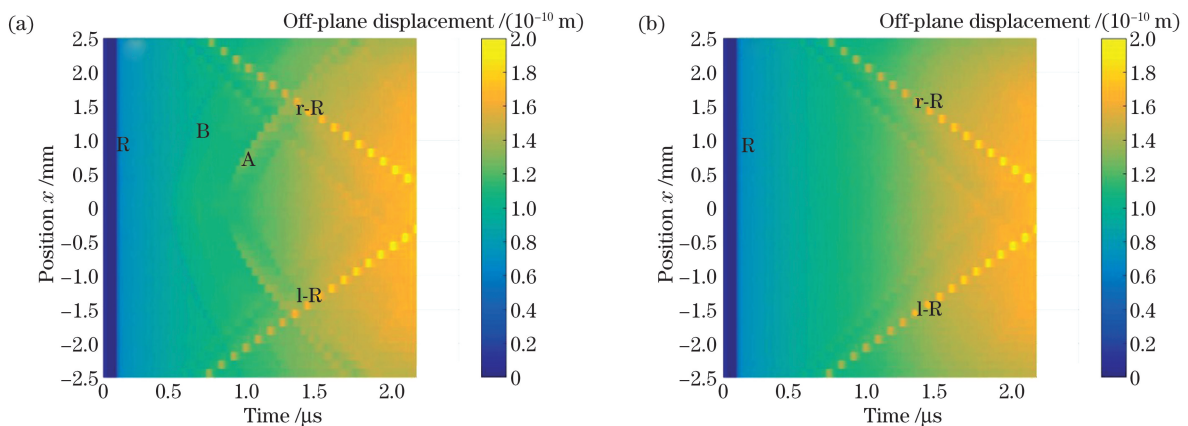


图 3 模拟的时域数据。(a)有缺陷模型 B-scan 图;(b)无缺陷模型 B-scan 图

Fig. 3 Simulated time-domain data. (a) B-scan diagram of model with defect; (b) B-scan diagram of model without defect

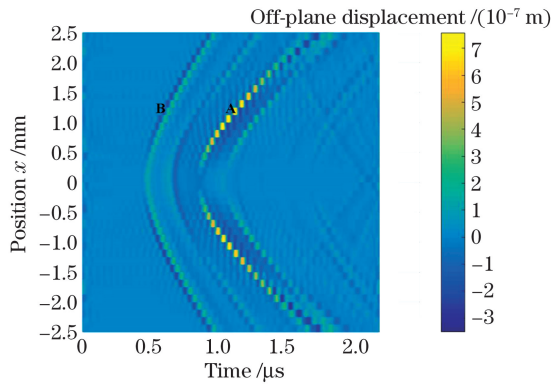


图 4 有缺陷模型 B-scan 图与无缺陷模型 B-scan 图之差  
Fig. 4 Difference between B-scan diagrams of models with and without defect

从图 4 可以看出,数据经过作差后,由缺陷引起的各模态信号更加明显,但从图中无法对缺陷位置进行准确的判断。因此根据第 2 节所述原理,使用 PSM 算法对该数据进行重建。

### 3.3 激发点与探测点的间距选择

由第 2 节可知,在 PSM 理论模型中,一般将超声换能器激发探测的过程等效为爆炸反射的过程,该方法多适用于使用同一换能器实现同点激发和接

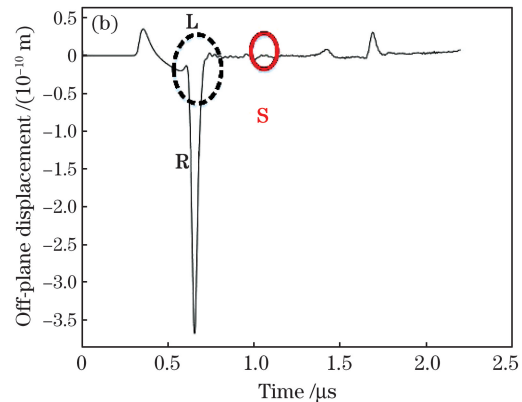
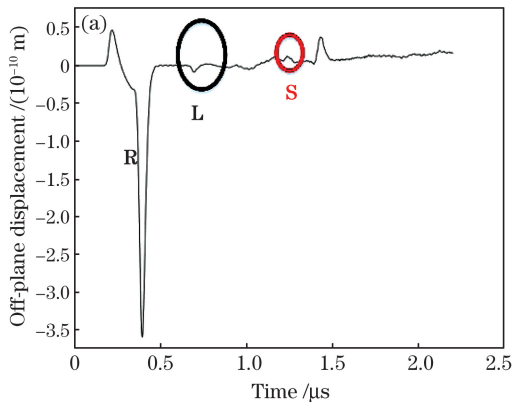


图 5 同激发不同探测所得时域图。(a)探测点位于 $-0.90$  mm;(b)探测点位于 $-0.15$  mm

Fig. 5 Time domain diagrams obtained by different detections with same excitation. (a) Detection point is at  $-0.90$  mm; (b) detection point is at  $-0.15$  mm

### 3.4 PSM 图像重构频率范围选择

在此之前发展了从单频、多频重构图像的角度使用衍射理论角谱法对模型数据进行三维重构的频域 SAFT 算法<sup>[10]</sup>。激光激发的超声脉冲宽度相对较宽,这一特性使得在使用 PSM 算法对激光超声获取的数据进行图像重构时可利用的频率成分也相对较多,因此本文在 PSM 计算过程中,针对特定的模式波选择合适的频率范围进行多频图像重构。

在 PSM 算法计算过程中,本文首先对数据进

收的超声换能器。在激光超声中,通常使用两束光分别实现超声信号的激发与探测,因此需要对激发、探测光间的距离关系进行讨论。

一方面,当激发和探测光重合时,样品吸收激发光时产生的大幅度热膨胀可能使得激光超声探测信号饱和,从而严重影响探测光对小幅度超声扰动的探测能力。因此在激光超声实验中需要将激发光和探测光分离。

另一方面,当激发、探测光距离较远时,以离面位移分量为主的表面波可能与缺陷反射/散射的体波信号重叠,从而使得目标信号被淹没,影响成像结果。图 5 所示为激发、探测点间距  $\Delta x = 1.10$  mm 和  $\Delta x = 1.85$  mm 的时域曲线。图 5(a)中较为明显的纵波缺陷反射信号 L 在图 5(b)中被幅值变化最大的表面波信号 R 所淹没。为了解决这一问题,可将激发光和探测光进行分离,且两者间距尽可能缩小。这样既可避免激发光导致的热膨胀对探测信号的影响,又可从时间上将沿表面传播的掠面纵波、声表面波等与体波反射信号完全区分开。考虑到激发光源宽度等因素,本文将激发探测点的间距设置为  $\Delta x = 0.10$  mm。

行时间  $t$  的快速傅里叶变化,根据所使用的激光超声模式信号的中心频率选择合适的图像重构频率范围;然后对该频率范围内某一频率分量的对应检测数据进行空间  $x$  上的快速傅里叶变换。使用第 2 节中推导得出的声场递推公式[(7)式]计算出该频率下感兴趣深度的声场;最后计算出所选频率范围内所有频率点的声场,根据深度进行累加求和,得到最终的 PSM 结果图。

PSM 结果图的信噪比取决于频率范围的选择。

由于有限元模拟时采样间隔较短(1 ns),总时长为  $2.2 \mu\text{s}$ 。当将时间域变换为频率域后,在  $50 \text{ kHz} \sim 20 \text{ MHz}$  内的可用频率成分仅有 44 个。为避免因使用的频率分量过少导致图像质量下降的问题,在对有限元数值模拟数据的 PSM 计算过程中,无论是选用

激光激发的横波还是纵波进行计算,本文均对  $50 \text{ kHz} \sim 20 \text{ MHz}$  内所有的频率成分进行反演重构。

图 6 分别为使用横波、纵波波速(横波、纵波波速均根据模型中的材料参数计算获得)进行重建得到的 PSM 结果。

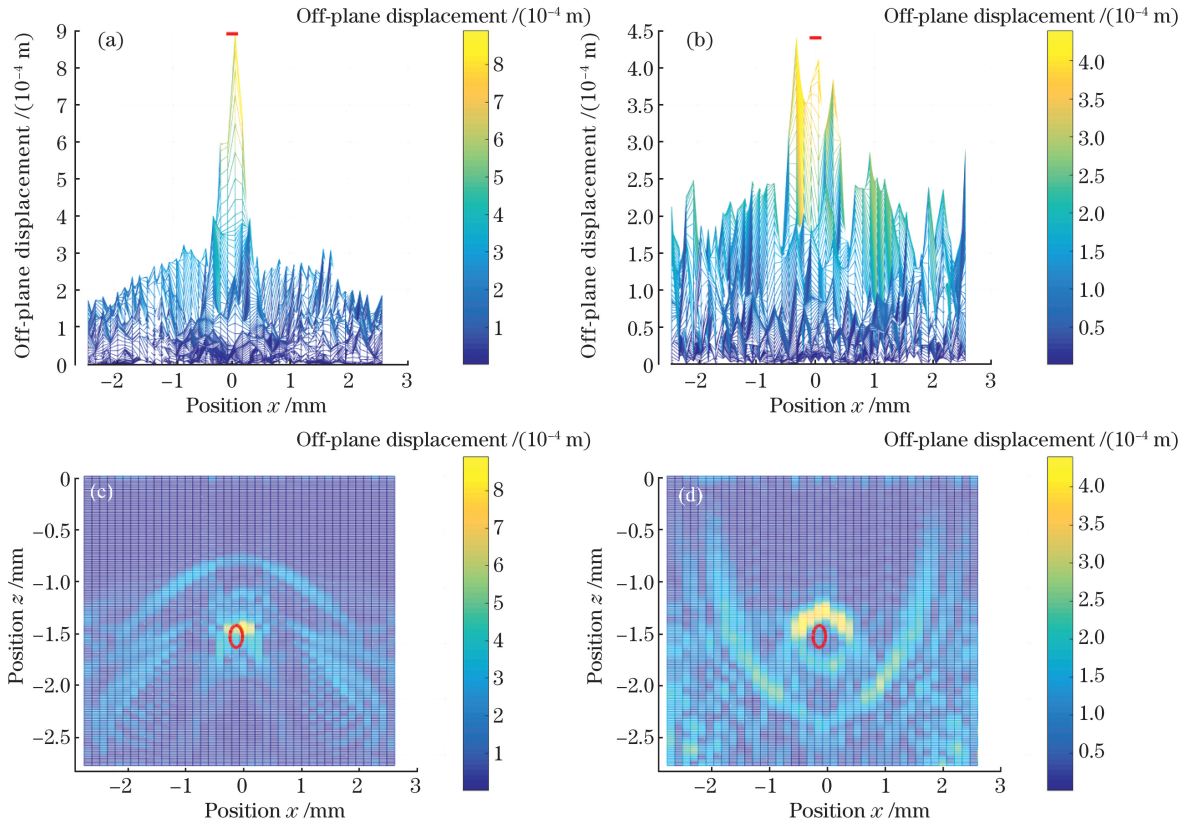


图 6 对图 2 进行 PSM 计算的结果。(a)横波 PSM 结果侧视图;(b)纵波 PSM 结果侧视图;(c)横波 PSM 结果正视图;(d)纵波 PSM 结果正视图

Fig. 6 PSM calculation results for Fig. 2. (a) Side view of PSM result of shear wave; (b) side view of PSM result of longitudinal wave; (c) front view of PSM result of shear wave; (d) front view of PSM result of longitudinal wave

如图 6 所示,椭圆圈标示了数值模型中缺陷的位置。通过对比图 6(a)与图 6(b)可以看出图 6(a)中的信号最大幅值约为图 6(b)中的信号最大幅值的 2 倍,且信噪比更高。图 6(c)中缺陷位于约  $z = -1.36 \text{ mm}$  的深度,误差约为 1.5%;其横向位置  $x = 0.05 \text{ mm}$ ,误差约为 1%;图 6(d)中,缺陷位于约  $z = -1.33 \text{ mm}$  深度,误差约为 0.7%;将成像图中幅值最高点的位置作为成像的缺陷位置,如图 6(b)所示,此时最高点位置在  $0.33 \text{ mm}$  左右,误差约为 6.5%。横波 PSM 结果图与纵波 PSM 结果图均较好地呈现了圆形缺陷的顶端散射。相较而言,从图 6(c)与图 6(d)的对比中可以发现,两图的缺陷位置与图 2 模型中的缺陷位置都较为一致,但图 6(c)所示的横波缺陷顶端散射较为集中,而图 6(d)所示

纵波缺陷顶端散射较为分散。综上所述,采用 PSM 算法时,激光激发的纵波和横波信息均可用于对模型中的缺陷进行检测,但横波的计算结果中的信噪比高于纵波。

## 4 实验验证

为验证数值模拟得到的结果的可靠性,本文进行了相应的验证实验。

图 7 所示为验证有限元模拟结果的实验装置图。实验使用的样品为铝板,尺寸为  $120 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。内含一个直径为  $0.5 \text{ mm}$ 、长度为  $10 \text{ mm}$  的横穿孔,孔顶距离样品表面约  $3.75 \text{ mm}$ 。实验将波长为  $1064 \text{ nm}$ 、能量为  $1000 \mu\text{J}$  的脉冲激光聚焦为线光源,作为激发光源,其能量控制在使样品

表面发生微弱熔蚀的范围内;使用激光测振仪(控制器型号 Polytec OFV-5000,光学头型号 Polytec OFV-505,波长  $\lambda \approx 633 \text{ nm}$ ,检测带宽 DC 约为 20 MHz)作为超声探测装置。探测光源与激发光源的距离  $\Delta x \approx 0.146 \text{ mm}$ 。使用步进电机控制铝板样品单向移动以实现激发、探测的同时扫查。激发探测点从距离缺陷中心约  $x_s = -11.5 \text{ mm}$  位置开始,向靠近缺陷的方向进行扫查,步长为  $0.05 \text{ mm}$ ,直至距离缺陷中心  $x_e = 13.45 \text{ mm}$  的位置,共计 500 步。激光测振仪与示波器相连接,示波器两采样点间隔  $5 \text{ ns}$ ,共采样 1400 个数据点。所得结果经 128 次平均后被记录。将示波器通过 USB 电缆线连接至计算机(PC),实现数据传输。

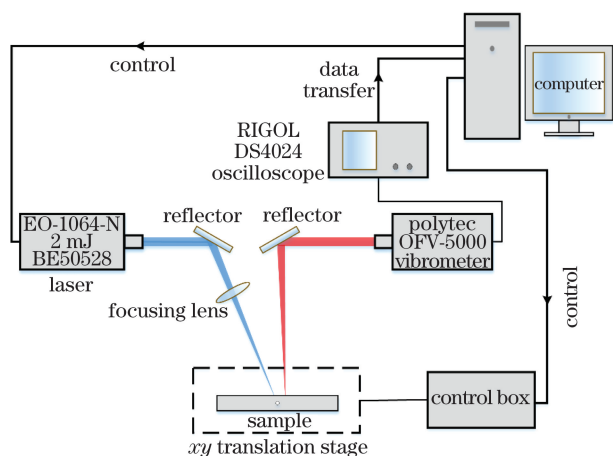


图 7 实验装置图

Fig. 7 Experimental setup

图 8 所示为实验所得 B-scan 图。

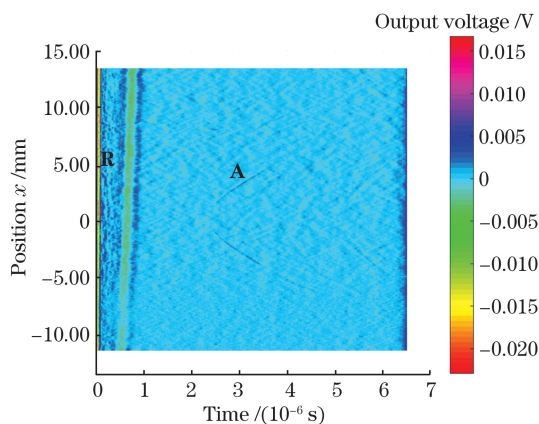


图 8 实验 B-scan 图

Fig. 8 Experimental B-scan diagram

图 8 中色坐标代表激光测振仪测量的超声离面位移的电压值。A 为缺陷反射横波信号,R 为直达表面波信号。

为与对有限元模拟数据进行 PSM 重构前的数据处理步骤相一致,使用实验起始扫查点获取的数据作为无缺陷数据。将每个时域数据与起始扫查点时域数据相减后,使用横波进行 PSM 重构,横波波速  $c \approx 3179 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据固定探测点、移动激发点实验得到的 B-scan 图,拟合得到图中由底面反射横波信号形成直线的斜率,进而得到横波波速。

为选择 PSM 计算时使用的最佳频率范围,本文首先对比了不同数量频率成分对 PSM 计算结果的影响。由于使用的频率数量的变化会造成使用的频率成分的变化,即频率数量和频率范围会同时间变化,因此本文借鉴文献[10]中的频率范围选择方式,固定横波的中心频率  $f_c = 10 \text{ MHz}$ 。选择 9 个不同的频率范围(分别为  $6.9 \sim 13.1 \text{ MHz}$ 、 $6.2 \sim 13.8 \text{ MHz}$ 、 $5.3 \sim 16.2 \text{ MHz}$ 、 $4.6 \sim 15.3 \text{ MHz}$ 、 $3.8 \sim 16 \text{ MHz}$ 、 $3.1 \sim 16.9 \text{ MHz}$ 、 $2.3 \sim 17.7 \text{ MHz}$ 、 $1.5 \sim 18.5 \text{ MHz}$ 、 $0.77 \sim 19.2 \text{ MHz}$ )的数据进行 PSM 计算,得到信噪比变化折线图以及计算时间变化折线图,如图 9 所示。

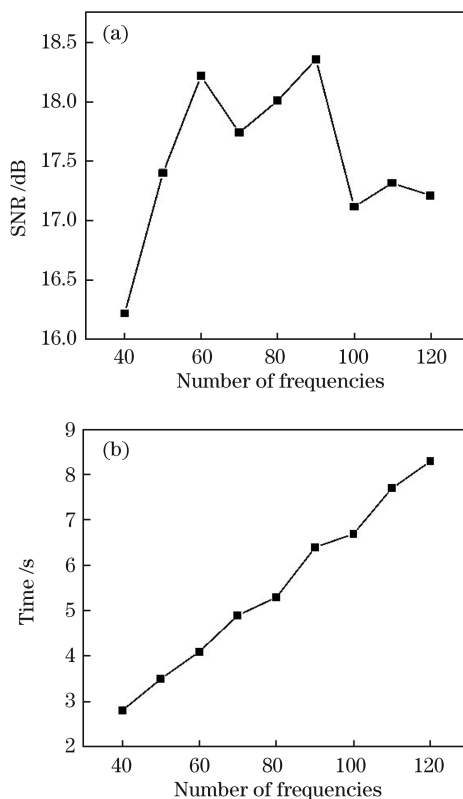


图 9 不同频率数量下的 PSM 重构结果。(a) SNR; (b) 计算时间

Fig. 9 PSM reconstructed results for different numbers of frequencies. (a) SNR; (b) calculation time

由图 9(a)可知,随着所使用频率数量的逐渐增多,有效高频分量的加入使得信噪比先总体呈上升趋势,随着选频范围的继续扩大,低频噪声分量的加入使得信噪比下降并趋于平稳。由图 9(b)可知,随着所使用频率数量的增多,计算时间呈上升趋势,最长耗时为 8.3 s。图 10 所示为使用频率数为 90 和 40 的 PSM 结果对比图,当使用的频率数为 90、频率

范围为 3.1~16.9 MHz 时,信噪比达到最高值。因此在本实验中使用频率范围为 3.1~16.9 MHz 内的 90 个频率成分反演得出的 PSM 结果图的最佳结果图。

图 10 为 3.1~16.9 MHz 频率范围和 6.9~13.1 MHz 频率范围的 PSM 反演结果图。

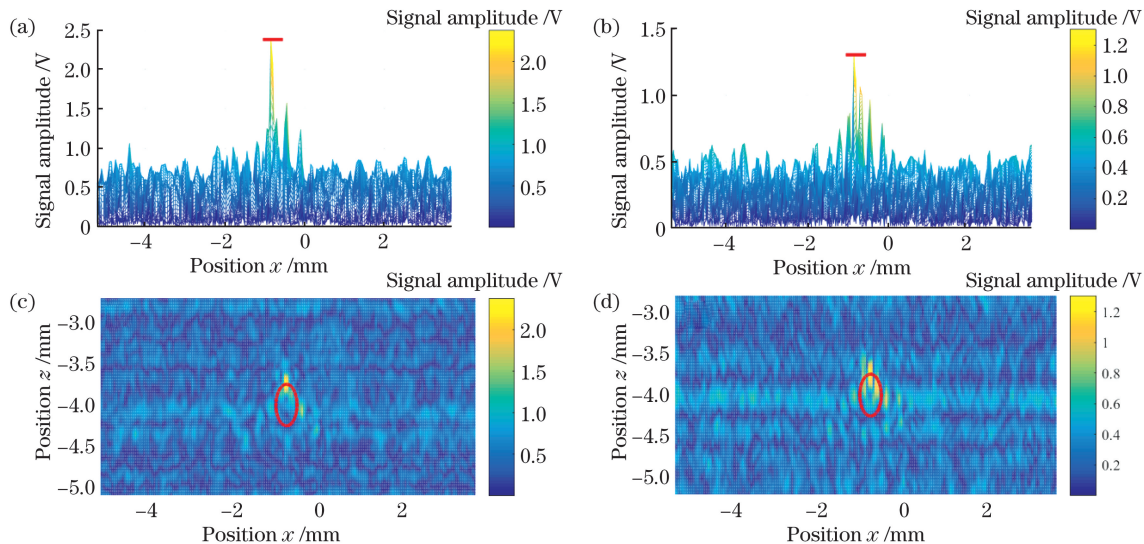


图 10 不同频率范围内的横波 PSM 结果图。(a) 3.1~16.9 MHz 内 PSM 结果图的侧视图;(b) 6.9~13.1 MHz 内 PSM 结果图的侧视图;(c) 3.1~16.9 MHz 内 PSM 结果图的主视图;(d) 6.9~13.1 MHz 内 PSM 结果图的主视图

Fig. 10 PSM results of shear wave for different frequency ranges. (a) Side view of PSM results from 3.1 to 16.9 MHz; (b) side view of PSM results from 6.9 to 13.1 MHz; (c) front view of PSM results from 3.1 to 16.9 MHz; (d) front view of PSM results from 6.9 to 13.1 MHz

通过对比图 10(a)与图 10(b),可以看出图 10(a)中的信号最大幅值约为图 10(b)中的信号最大幅值的 2 倍,且信噪比更高。图 10(c)中,缺陷位于  $z \approx -3.74$  mm 深度,误差约为 0.3%;其横向位置  $x = -0.85$  mm,误差约为 0.6%;图 10(d)中,缺陷位于  $z \approx -3.75$  mm 深度,其横向位置  $x = -0.85$  mm,误差约为 0.6%;两幅结果图中的缺陷顶端位置与实际缺陷位置都几乎一致。相较而言,图 10(c)中的图像信噪比比图 10(d)中的图像信噪比更高,这证实了 PSM 频率选择的有效性。

与此同时,本文对比了基于延迟求和算法的时域 SAFT 与基于 PSM 的频域 SAFT 的计算速度。结果显示,处理相同的模型时,时域 SAFT 计算所需时长约为 1500 s,是频域 SAFT 计算所需时长的 180~535 倍,这再次证实了频域 SAFT 的高效性。

## 5 结 论

通过分析激光激发的各模态超声波的传播特

性,将脉冲激光源位置与探测激光位置分离至  $10^{-4}$  m 范围内(属于异点激发探测),编写了适用于该类型激发探测的频域 SAFT 相移迁移算法。在对激光测振仪所探测数据的 PSM 图像进行重建的过程中,利用激光激发超声所具有的宽带特性,分析所用的模式波信号的中心频率,选取合适的频率范围,以避免低频噪声和低频噪声的影响,同时提高了图像的信噪比并且大大缩短了计算所耗时间。使用 PSM 算法处理有限元模拟数据及实验数据,根据所得结果可较为准确地对缺陷位置进行判断与定位,从而证实了该算法在激光超声成像领域的可行性。

## 参 考 文 献

- [1] Song D Y, Wang X S. Laser defect detection techniques for very large scale integration (VLSI) wafers [J]. Laser Journal, 1998, 19(6): 3-5.  
宋登元, 王秀山. 超大规模集成电路芯片的激光缺陷检测技术 [J]. 激光杂志, 1998, 19(6): 3-5.
- [2] Li X K. Research on the key technology of image detection of bridge cable surface defects [D].



- Chongqing: Chongqing University, 2014.
- 李新科. 桥梁拉索表面缺陷图像检测关键技术的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [3] Wang S T, Yang Y Y, Zhao L M, et al. Numerical simulation research on scattering light imaging of surface defects of optical components [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0708005.
- 王世通, 杨雨英, 赵丽敏, 等. 光学元件表面缺陷散射光成像数值模拟研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708005.
- [4] Shen Y, Chen Z Y, Qiu J R, et al. Research progress on parallel spectral domain optical coherence tomography technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(2): 0207004.
- 沈毅, 陈志彦, 邱建榕, 等. 并行谱域光学相干层析成像技术的研究进展[J]. 中国激光, 2018, 45(2): 0207004.
- [5] Shen Y D. Modern nondestructive testing technology [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2012: 12-67
- 沈玉娣. 现代无损检测技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2012: 12-67
- [6] Du Y H. Research on synthetic aperture focused ultrasound imaging technology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- 杜英华. 合成孔径聚焦超声成像技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [7] Li J Y, Shen Z H, Ni X W, et al. Laser-ultrasonic non-destructive detection based on synthetic aperture focusing technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0904003.
- 李俊燕, 沈中华, 倪晓武, 等. 基于合成孔径聚焦技术的激光超声无损检测方法研究[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0904003.
- [8] Luo R. Research on principal axis ultrasound imaging method based on frequency domain synthetic aperture focusing [D]. Nanchang: Hangkong University, 2018.
- 罗嵘. 基于频域合成孔径聚焦的主轴超声成像方法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [9] Sun B S, Shen J Z. Synthetic aperture focused ultrasound imaging (1) [J]. Applied Acoustics, 1993, 12(3): 43-48.
- 孙宝申, 沈建中. 合成孔径聚焦超声成像(一)[J]. 应用声学, 1993, 12(3): 43-48.
- [10] Sun B S, Shen J Z. Synthetic aperture focused ultrasound imaging (2) [J]. Applied Acoustics, 1993, 12(5): 39-45.
- 孙宝申, 沈建中. 合成孔径聚焦超声成像(二)[J]. 应用声学, 1993, 12(5): 39-45.
- [11] Sun B S, Shen J Z. Synthetic aperture focused ultrasound imaging (3) [J]. Applied Acoustics, 1993 (3): 39-44.
- 孙宝申, 沈建中. 合成孔径聚焦超声成像(三)[J]. 应用声学, 1993(3): 39-44.
- [12] Sun B S, Zhang F, Shen J Z. Synthetic aperture focusing in time-domain for acoustic imaging [J]. Acta Acustica, 1997, 22(1): 42-49.
- 孙宝申, 张凡, 沈建中. 合成孔径聚焦声成像时域算法研究[J]. 声学学报, 1997, 22(1): 42-49.
- [13] Stepinski T, Lingvall F. Optimized algorithm for synthetic aperture imaging [C]//IEEE Ultrasonics Symposium, 2004, August 23-27, 2004, Montreal, Quebec, Canada. New York: IEEE Press, 2004: 701-704.
- [14] Stolt R H. Migration by Fourier transform [J]. Geophysics, 1978, 43(1): 23-48.
- [15] Busse L J. Three-dimensional imaging using a frequency-domain synthetic aperture focusing technique [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1992, 39(2): 174-179.
- [16] Bednar J B. A brief history of seismic migration[J]. Geophysics, 2005, 70(3): 1342-1351.
- [17] Olofsson T, Stepinski T. Phase shift migration for imaging layered materials and objects immersed in water [J]. 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2009: 673-676.
- [18] Skjelvareid M H, Birkelund Y, Olofsson T, et al. Ultrasonic imaging of pitting using multilayer synthetic aperture focusing [C]//2011 IEEE International Ultrasonics Symposium, October 18-21, 2011, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2011: 2042-2045.
- [19] Lukomski T, Stepinski T, Kowal J. Synthetic aperture focusing technique with virtual transducer for immersion inspection of solid objects[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2012, 54(11): 623-627.
- [20] Li J, Ni C Y, Zhang H C, et al. Detection of micro-crack by ultrasonic approach of one-sided pitch-catch method based on laser assisted heating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0408008.
- 李加, 倪辰荫, 张宏超, 等. 基于激光辅助加热的激光超声投捕法识别微裂纹[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408008.
- [21] You B W, Ni C Y, Shen Z H. Laser ultrasonic real-time monitoring of photothermal modulation crack closure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0204009.
- 尤博文, 倪辰荫, 沈中华. 光热调制裂纹闭合的激光超声实时监测 [J]. 中国激光, 2019, 46(2):

- 0204009.
- [22] Zheng J, Shen Z H, Ni C Y. Experimental study on simulated crack closure using laser ultrasonic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1212003.  
郑杰, 沈中华, 倪辰荫. 模拟裂纹闭合的激光超声实验研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1212003.
- [23] Xu W, Shen Z H, Ni C Y, et al. Influence of temperature on zero-group-velocity lamb waves of thin plate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1202005.  
许薇, 沈中华, 倪辰荫, 等. 温度对薄板中零群速度 Lamb 波的影响 [J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1202005.
- [24] Levesque D, Ochiai M, Blouin A, et al. Laser-ultrasonic inspection of surface-breaking tight cracks in metals using SAFT processing [C]//2002 IEEE Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings, October 8-11, 2002, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2002: 753-756.
- [25] Lévesque D, Blouin A, Néron C, et al. Performance of laser-ultrasonic F-SAFT imaging [J]. *Ultrasonics*, 2002, 40(10): 1057-1063.
- [26] Lévesque D, Bescond C, Lord M, et al. Inspection of additive manufactured parts using laser ultrasonics [J]. *AIP Conference Proceedings*, 1706(1): 130003.
- [27] Lévesque D, Asaumi Y, Lord M, et al. Inspection of thick welded joints using laser-ultrasonic SAFT [J]. *Ultrasonics*, 2016, 69: 236-242.
- [28] Li M Q, Tian T X. Mathematical and physical equations [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 2014: 18-43  
李明奇, 田太心. 数学物理方程 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2014: 18-43
- [29] Zhang J P, Qin X P, Yuan J X, et al. Defect location and size detection based on laser ultrasonic diffraction bulk wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1214002.  
张进朋, 秦训鹏, 袁久鑫, 等. 基于激光超声衍射体波的缺陷定位定量检测 [J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1214002.
- [30] Shen Z H, Yuan L, Zhang H C, et al. Laser ultrasound in solids [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2015: 9-10  
沈中华, 袁玲, 张宏超, 等. 固体中的激光超声 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 9-10

## Application of Phase Shift Migration Method in Laser Ultrasonic SAFT

Chen Chu<sup>1</sup>, Ying Kaining<sup>1</sup>, Liu Nian<sup>1</sup>, Dai Lunan<sup>2</sup>, Kan Weiwei<sup>2\*\*</sup>, Ni Chenyin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

<sup>2</sup> School of Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

### Abstract

**Objective** The positioning and even imaging of small defects inside metal workpieces can avoid unqualified workpieces. An ultrasound imaging technology is based on the property of ultrasound which can penetrate opaque objects to obtain images of target objects, and is widely used in various fields. Traditional ultrasonic imaging data is mostly obtained by using ultrasonic transducers, such as piezoelectric transducers and electromagnetic acoustic transducers, to excite and detect ultrasonic waves on the surface of the material. However, these ultrasonic detection technologies have limitations in specific environments. On the other hand, laser ultrasonic nondestructive testing technology (NDT&E) can provide possibilities to overcome the shortcomings of traditional ultrasonic testing methods. Traditional laser ultrasonic defect detection methods include A-scan, B-scan, C-scan, etc. Most of these methods cannot accurately determine the size and location of the defect. Apart from this, the synthetic aperture focusing technology (SAFT) is widely used in the field of ultrasound imaging due to its ability of imaging of small defects and high imaging contrast. Our research combines the laser ultrasonic NDT&E with SAFT algorithm, which can realize imaging of small defect when it is used as the traditional ultrasonic transducer, and can also bring the advantages of laser ultrasound. The propagation and interaction with defects of laser ultrasound in metallic samples are numerically simulated by Comsol Multiphysics and the PSM-SAFT algorithm is compiled and verified by experiments to be suitable for laser ultrasound. Results indicate that the algorithm can effectively detect and locate small defects, and the image reconstruction speed is faster than that of the time domain SAFT algorithm. It can provide faster real-time technical solutions for laser ultrasonic NDT&E.

**Methods** The propagation mechanism of laser ultrasound in high-strength steel samples, as well as the interaction of the high-strength steel with circular through-hole defects, was numerically simulated by Comsol Multiphysics. The PSM-SAFT algorithm for laser ultrasound based on the principle of explosive reflection was then derived and adapted. Using the model data obtained by the finite element method, samples were imaged using longitudinal wave and shear wave signals, respectively. Then, the defect position error and signal-to-noise ratio were used for analyzing the imaging results of the two modes. Subsequently, in order to verify the applicability of the algorithm in actual application, an experimental device for laser excitation and Doppler-based vibrometer detection was built. PSM imaging was performed using one-dimensional scanning experimental data. Finally, different frequency ranges were selected by analyzing the center frequency of the selected acoustic waves, and the signal-to-noise ratio and imaging speed of the PSM imaging were compared.

**Results and Discussions** In the finite element simulation, we compared the time domain B-scan results of simulated data with and without circular defects. It can be found that there are obvious defect reflection signals in the defective B-scan graph (Fig. 3). If a difference between the model data with and without circular defects is made, the reflected signal of defects can be highlighted (Fig. 4). Then shear wave and longitudinal wave were used to perform PSM imaging on all simulation data in the frequency range of 50 kHz–20 MHz (Fig. 6). By comparing the signal-to-noise ratio of images and the position error of the defect, it is concluded that the calculation result of the shear wave is better than that of longitudinal wave. In the experiment, by analyzing the frequency spectrum of the time domain signal, it can be obtained that the center frequency of the shear wave is about 10 MHz. Therefore, nine different frequency ranges are selected for PSM imaging, and the signal-to-noise ratio and imaging time of each image are compared (Fig. 9). It can be found that when the frequency range is 3.1–16.9 MHz (90 frequency components in total), the PSM imaging results are optimized (Fig. 10). In addition, after comparing the imaging time lengths of the time domain DAS-SAFT algorithm and the reported frequency domain PSM algorithm, it is concluded that by using the same model, the calculation time of the frequency domain PSM algorithm is only 1/535–1/180 of that of the frequency domain DAS algorithm.

**Conclusions** In this paper, a frequency domain SAFT phase shift algorithm suitable for laser ultrasound is developed. In the process of PSM image reconstruction using experimental data, the broadband characteristics of laser-excited ultrasound are effectively used. By analyzing the center frequency of the acoustic wave mode used, a suitable frequency range is selected. This method not only avoids the influences of low-frequency noise and high-frequency noise, but also improves the signal-to-noise ratio of the image, and greatly reduces the consumed time for calculation. The results obtained by PSM algorithm for finite element simulation data and experimental data can accurately locate the defect position, which proves the feasibility of the algorithm in the field of laser ultrasound imaging.

**Key words** sensors; laser ultrasound; synthetic aperture focusing technique; phase shift migration method; imaging algorithm; nondestructive test

**OCIS codes** 280.3375; 120.4290; 110.7170