引文格式:李天佑,王伟,邵波,等. 激光超声PSM成像算法误差研究及改进[J]. 太原理工大学学报,2026,57(5):1029-1037.

LI Tianyou, WANG Wei, SHAO Bo, et al. Research and improvement of laser ultrasound PSM imaging algorithm error[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(5): 1029-1037.

激光超声PSM成像算法误差研究及改进

李天佑[1],王 伟[2],邵 波[3],刘 宏[2],张彦杰[1,4],郭仕敏[5],徐玉东[2]

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院,山西 太原;2. 国网山西省电力公司电力科学研究院,山西 太原;3. 中国电子科技集团公司第三十三研究所,山西 太原;4. 先进金属复合材料成形技术与装备教育部工程研究中心,山西 太原;5. 山西晋缘电力化学清洗中心有限公司,山西 太原)

摘 要:**【目的】**针对激光超声检测中激发点和检测点分离会导致传统相移迁移法(PSM)出现成像误差的问题,提出了一种等效速度的数值计算方法来改进PSM算法。**【方法】**首先,基于激光超声检测的几何配置,利用数值计算的方法在频率-波数域内计算等效速度,进而改进PSM算法并给出计算流程。为比较在激发点和检测点分离时传统PSM算法与改进PSM算法的成像效果,给出了两个包含点目标的模拟成像例子。**【结果】**结果表明传统PSM算法的深度定位误差随激发点和检测点之间的距离增大而增大,随成像深度的增加而减小。所有点目标在改进的PSM算法成像中都很好地聚焦于实际位置,验证了该方法的有效性。

关键词:激光超声检测;数值计算法;相位迁移法;合成孔径聚焦技术;成像算法

中图分类号:TN247 **文献标识码**:A

DOI:10.16355/j.tyut.1007-9432.20240465 **文章编号**:1007-9432(2026)05-1029-09

Research and Improvement of Laser Ultrasound PSM Imaging Algorithm Error

LI Tianyou[1], WANG Wei[2], SHAO Bo[3], LIU Hong[2], ZHANG Yanjie[1,4], GUO Shimin[5], XU Yudong[2]

(1. *College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China*; 2. *State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan, Shanxi, China*; 3. *The 33rd Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan, Shanxi, China*; 4. *Engineering Research Center of Advanced Metal Composites Forming Technology and Equipment, Ministry of Education, Taiyuan, Shanxi, China*; 5. *Shanxi Jinyuan Electric Power Chemical Cleaning Center Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, China*)

Abstract: **【Purposes】**Aiming at the problem that the separation of excitation point and detection point in laser ultrasonic testing will lead to imaging errors in the traditional phase shift migration (PSM) algorithm, a numerical calculation method of equivalent velocity is proposed to improve the PSM algorithm. **【Methods】** First, On the basis of the geometric configuration of laser ultrasonic testing, the equivalent velocity was calculated in the frequency-wavenumber domain by using numerical calculation methods, and then the PSM algorithm was improved with the given calculation process. In order to compare the imaging effects of the traditional PSM algorithm and the improved PSM algorithm

收稿日期:2024-06-07;**修回日期**:2024-07-20

基金项目:国家自然科学基金(52105557);中国博士后科学基金(2023M742443);山西省应用基础研究计划项目(20210302124051);山西省重点研发计划项目(202102110401016,202302010101006)

第一作者:李天佑,硕士研究生,(E-mail)litianyou0066@link.tyut.edu.cn

通信作者:邵波,高级工程师,主要从事电磁防护及检测技术相关研究,(E-mail)shawboo@163.com

when the excitation point and the detection point are separated, two simulated imaging examples containing point targets were given.【**Results**】The results show that the depth positioning error of the traditional PSM algorithm increases with the increase of distance between excitation point and detection point and decreases with the increase of imaging depth. All point targets are well focused on their actual positions in the improved PSM algorithm imaging, which verifies the effectiveness of this method.

Keywords: laser ultrasonic testing; numerical calculation method; phase shift migration algorithm; synthetic aperture focusing technology; imaging algorithm

随着工业生产技术的快速发展,先进的无损检测技术也越来越重要。常用的无损检测技术包括液体渗透检测[1]、磁粉检测[2]、涡流检测[3]、射线检测[4]、声发射检测[5]、热红外成像[6]及超声检测[7]等。超声波穿透力强,特征参数丰富因此适用于多种材料的无损检测。但是传统超声检测中超声探头需要与被测工件通过耦合剂间接的接触,这在一定程度上限制了超声检测的应用场景(如高温、高压等环境)。激光超声检测(LU)技术[8]是超声检测技术的远距离实现,它通过光学的手段在工件中激发和检测超声波,避免了探头和被测物体之间的耦合问题,而且具有更高的空间分辨率和灵敏度。

传统的激光超声缺陷检测方法包括脉冲回波法、投捕法、时间飞行散射法和扫描激光源法等方法[9]。这些方法大多基于一维信号,通过提取特征信号进行间接的缺陷识别,而超声波成像技术能够直接呈现出缺陷的图像,更加直观且便于后续处理。成像技术基于探测元件对检测目标进行逐点逐行的扫查,扫查数据也可直接用于成像,如B扫图、C扫图等。但是直接使用小孔径探测元件的扫查数据成像的分辨率低,需要通过成像算法进一步提高成像质量。合成孔径聚焦成像技术(SAFT)本质上是一种将小孔径扫描数据转换为大孔径检测数据的数据处理方法,可以在时域(T-SAFT)和频域(F-SAFT)中进行。近几年来利用合成孔径技术处理激光超声检测数据以获得高精度缺陷图像的案例屡见报道。倪辰荫[10]使用多模式T-SAFT检测带有侧钻孔的样品。何志同[11]应用压缩感知理论,基于最优扫描区域内的扫描数据进行SAFT成像,大大提高了检测效率。李俊燕[12]通过移动线光源在工件内激发超声波,并利用SAFT算法对内部缺陷进行成像。T-SAFT需要计算波的传播路径以计算时间延迟因此计算耗时。F-SAFT的数据处理过程是在频率-波数域内进行的,主要分为ω-k算法和相移迁移(PSM)算法。ω-k算法[13,14]的计算速度快,但是只适用于波速恒定的材料,而PSM算法[15-17]则能够处理分层复合材料和具有复杂界面的样品。陈楚[18]分析了激发激光的各模态超声波传播特性,确定了脉冲激光和探测激光的位置关系,使用PSM算法对激光测振仪所测数据进行成像。赵杨[19]采用PSM算法对模拟的激光超声信号进行探测图像的重构。与传统超声自收自发的检测模式不同,激光超声检测中脉冲激光和检测激光是不重合的,直接使用传统SAFT算法会导致成像误差。T-SAFT以射线追踪法为基础,因此能够适应各种激发-接收方式[20]。F-SAFT的修正往往借助于等效速度的修正[21],戴鹭楠提出了一种基于等效速度修正的精确F-SAFT算法对激光超声检测数据进行聚焦成像[22],同样的技术也用于校正双金属复合板成像[23]。

本文旨在改进PSM算法使之能够适应激光超声检测过程中激发点和检测点分离的工况。首先从激光超声检测的几何配置出发采用数值计算的方法在频率-波数域内计算等效速度,进而提出基于激光超声检测数据的PSM聚焦成像算法并给出计算流程。为检验所提出改进PSM算法的性能并探究传统PSM算法在处理激光超声检测数据时的局限性,进行两种点分布模拟成像。研究传统PSM算法的缺陷定位误差分布规律并验证改进PSM算法的正确性。对比两种成像算法的聚焦成像结果,验证当激发点和检测点分离时,改进的PSM算法成像的优越性。

1 激光超声检测工况

激光超声检测系统的结构如图1所示。脉冲激光器发出的脉冲激光经透镜聚焦到样品表面,激发点处局部温度升高产生热膨胀导致样品表面激发超声波。携带样品内部结构信息的超声波传至样品表面造成样品表面的微小振动,光学干涉仪如双波混合干涉仪(TWM干涉仪)能够收集这些信息并通过示波器等信息采集装置传入中央控制系统记录和分析。当一个位置上的检测完成时,中央控制

单元会对控制器下达指令驱动步进电机使电动平台带动样品移动到下一个检测位置。为避免激发点处热膨胀对接收信号的影响，激发点和检测点之间存在固定的距离偏置 h。

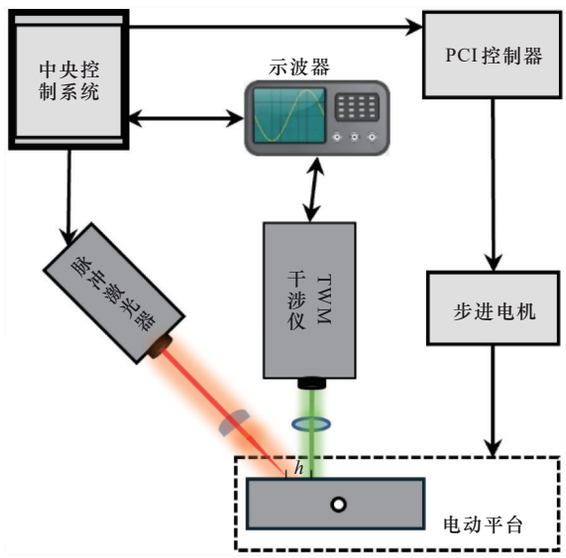


图 1　激光超声检测系统示意图

Fig. 1　Schematic diagram of laser ultrosonic testing system

2　成像方法

2.1　相移迁移算法

相移迁移（PSM）法是传统超声领域最常用的成像算法。根据惠更斯原理，当超声波到达缺陷边缘时，可将缺陷边缘视作新的次波源并向外辐射超声波。传统超声成像基于自收自发的压电探头，探头收集的信号可看作是由样品内部缺陷发出的超声波，这就是经典的爆炸反射模型，如图 2(a)所示，图中 E 为激发点，R 为检测点。激光超声检测过程如图 2(b)所示，区别于传统压电探头，为避免激发点处热膨胀的影响，激发点和检测点一般不重合。

不同于时域合成孔径聚焦算法需要成像区域内的超声波传播路径，PSM 算法从二维波动方程出发，在频率-波数域内模拟波从缺陷点到检测点的传播过程并成像。设 $p(x, z, t)$ 为超声波传播过程中点 (x, z) 在 t 时刻的声压，则二维波动方程如下：

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

式中 x 为扫查方向，z 为深度方向，c 为介质中的波速。利用对 x, z, t 的傅里叶变化可以得到：

$$\left(-k_x^2-k_z^2+\frac{\omega^2}{c^2}\right)P(k_x,k_z,\omega)=0\,. \tag{2}$$

式中 k_x 和 k_z 分别为沿 x 方向和 z 方向的波数，ω 为频率，$P(k_x, k_z, \omega)$ 为傅里叶变换结果。当只考虑非凡解即 $P(k_x, k_z, \omega)$ 不等于 0 的情况下，则有如下色散方程：

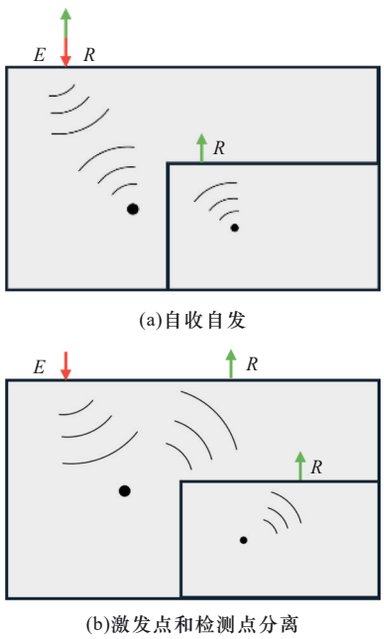


图 2　两种工况下的爆炸反射模型

Fig. 2　Explosion reflection models with two working conditions

$$k_x^2+k_z^2=\frac{\omega^2}{c^2}\,. \tag{3}$$

相位迁移过程一般沿深度方向进行，在只考虑上行波分量的情况下，式(3)有如下解：

$$k_z=-\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2}-k_x^2}\,,\text{其中}\frac{\omega^2}{c^2}-k_x^2\geqslant 0\,. \tag{4}$$

对(1)中 x、t 进行傅里叶变换，可得下式：

$$\left(-k_x^2+\frac{\partial^2}{\partial z^2}+\frac{\omega^2}{c^2}\right)P(k_x,z,\omega)=0\,. \tag{5}$$

将式(4)代入式(5)中，并解微分方程得：

$$P(k_x,z,\omega)=P(k_x,0,\omega)\exp\left(-\mathrm{j}z\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2}-k_x^2}\right). \tag{6}$$

式中 $P(k_x, 0, \omega)$ 为检测平面的二维频谱，$P(k_x, z, \omega)$ 为深度 z 平面的二维频谱。式(6)表示由检测平面的波场外推至深度 z 平面波场的过程。在爆炸反射模型中超声波由缺陷到检测点单向传播，而实际传播路径为激发点-缺陷-检测点。为保证整个检测过程时间的一致性，公式(6)中的波速 c 应由等效波速 c_{eq} 代替。此时公式(6)可写为：

$$P(k_x,z,\omega)=P(k_x,0,\omega)\alpha(k_x,z,\omega)\,. \tag{7}$$

$$\alpha(k_x,z,\omega)=\exp\left(-jz\sqrt{\frac{\omega^2}{c_{\mathrm{eq}}^2}-k_x^2}\right). \tag{8}$$

式(8)中 $\alpha(k_x, z, \omega)$ 为相移因子，与 x 方向波数

k_x、成像深度z、频率ω及等效波速c_{eq}均相关。对$P(k_x,z,\omega)$进行二维傅里叶逆变换即可获得成像矩阵$I(x,z)$。在爆炸反射模型中将缺陷点视作波源，$t=0$时刻振幅最强，因此通常将成像条件设为$t=0$，这在一定程度上可以简化计算过程并获得良好的成像效果。点(x,z)处的振幅可由下式给出：

$$I(x,z)=\iint P(k_x,z,\omega)e^{ik_x x}\mathrm{d}k_x\mathrm{d}\omega\,. \tag{9}$$

2.2 激发点和检测点分离时的PSM算法修正

如图2(a)所示，爆炸反射模型中超声波由缺陷传至检测点(即回波路径)，在传统超声自收自发的情况下，回波路径长度为实际路径的一半，为保证时间等同，等效波速c_{eq}也为实际波速c的一半。但是在激光超声检测中激发点与检测点不重合，回波路径与实际路径之比随激发点检测点之间的距离及缺陷的位置变化而变化，c_{eq}的变化十分复杂，不能简单地取$c/2$。

本文采用一种数值方法从几何配置出发近似地计算c_{eq}，从而能够使用PSM算法处理激光超声检测数据，提高检测成像质量。c_{eq}的计算原理如图3所示。图3中$E(x_E,0)$为激发点位置，$R(x_R,0)$为检测点位置，$O(x_0,z_0)$为缺陷点位置，$M(x_R-h/2,0)$为激发点和检测点中点，h为激发点和检测点之间的距离。θ_T为激发角，θ_R为检测角，θ_M为等效检测角。L_1、L_2及L_3分别为EO、RO和MO的长度。根据爆炸反射模型的定义及实际传播时间与简化模型时间的一致性，等效速度c_{eq}可由下式计算：

$$c_{eq}=\frac{cL_3}{L_1+L_2}\,. \tag{10}$$

L_1、L_2、L_3与角度θ_T、θ_R、θ_M有如下的几何关系：

$$L_1=\frac{z_0}{\cos\theta_T},L_2=\frac{z_0}{\cos\theta_R},L_3=\frac{z_0}{\cos\theta_M}\,. \tag{11}$$

因此c_{eq}可由θ_T、θ_R、θ_M表示为：

$$c_{eq}=\frac{c\cos\theta_T\cos\theta_R}{\cos\theta_M(\cos\theta_T+\cos\theta_R)}\,. \tag{12}$$

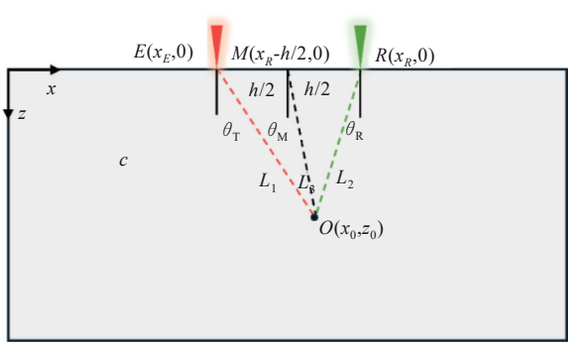


图3 等效速度c_{eq}计算原理图

Fig. 3 Equivalent speed c_{eq} calculation principle diagram

影响c_{eq}的因素很多，当缺陷点位置变化或激发点和检测点间距h发生变化时，就需要重新计算。为了减小计算量，本文引入一种在频域-波数域内计算c_{eq}的数值计算方法，具体计算步骤如下。首先我们计算在一个给定成像范围，给定成像深度z内每个横向位置x上的激发角θ_T，检测角θ_R，等效检测角θ_M，从而获得函数关系$f(\theta_T,\theta_R,\theta_M)$。在频率-波数域内有如下关系[24]：

$$k_x=k(\sin\theta_T'+\sin\theta_R')\,. \tag{13}$$

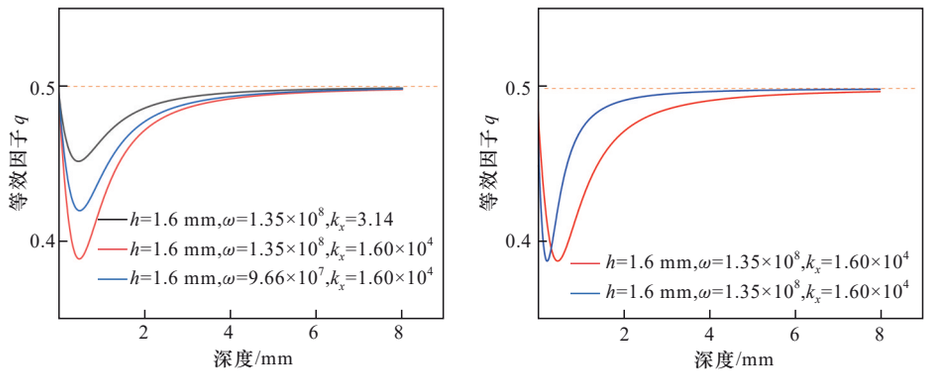
式中k为波数，$k=\omega/c$，θ_T'和θ_R'分别为对应ω和k_x下的激发角和检测角，代入函数关系式$f(\theta_T,\theta_R,\theta_M)$当中即可求出对应的等效检测角$\theta_M'$。将$\theta_T'$、$\theta_R'$及$\theta_M'$代入式(12)中即可求出固定$\omega$和$k_x$下的$c_{eq}$。

不同成像深度z下的函数关系式$f(\theta_T,\theta_R,\theta_M)$不同，因此当介质中声速$c$恒定的情况下，$c_{eq}$是一个受$\omega$、$k_x$、$h$和$z$四个因素影响的变量。图4(a)为$h=1.6$ mm时等效因子q随深度变化的曲线，$q=c_{eq}/c$。当h相同时，ω和k_x不同，q随z的变化规律也不同。但q总低于0.5，即在激发点和检测点分离的情况下，等效速度c_{eq}总低于实际波速c的一半。如果直接按自收自发的模型进行PSM算法聚焦成像，则成像深度要比实际深度深，q的数值越小误差越大。从图4中可以看出，三条曲线在深度0 mm至2 mm之间，q先变小后增大，且具有极小值，深度越深q越趋近于0.5且变化幅度变小。这意味着直接使用$c_{eq}=c/2$的传统PSM算法，在较浅的深度具有较大的成像误差，而在较深的深度误差较小。图4(b)为$h=0.8$ mm和1.6 mm时q的变化曲线。可以看出$h=0.8$ mm时的极小值点出现的深度更浅，且在$h=1.6$ mm曲线的极小值点之后的深度，$h=0.8$ mm的q更接近0.5，误差更小。极小值点的位置很浅(在图4(b)中，$h=1.6$ mm曲线极值点出现在0.5 mm左右)，我们所讨论的缺陷一般处于更深的深度。因此在一般情况下，当其他条件均相同时h越大q越小，传统PSM成像误差就越大。

激发点和检测点分离的情况下的PSM算法聚焦成像步骤要比自收自发情况下的更加复杂。深度z平面的成像矩阵计算过程如图5所示。整体成像矩阵的具体步骤如下。

步骤1：原始信号集$p(x,z,t)$进行x和t上的二维傅里叶变换得到扫查平面的二维频谱$P(k_x,0,\omega)$；

步骤2：确定成像范围，扫查步距Δx，激发点和检测点之间的偏置距离h和成像深度z等几何



(a)h=1.6 mm 时等效因子 q 变化曲线　　(b)h=1.6 mm 和 0.8 mm 时等效因子 q 变化曲线

图 4　等效因子 q 随深度的变化曲线

Fig. 4　Curves of equivalent factor q with depth

参数；

步骤 3：由数值计算方法得深度 z 平面的等效速度 $c_{eq}(k_x,\omega)$，得到相移因子 $\alpha(k_x,z,\omega)$；

步骤 4：由 $P(k_x,0,\omega)$ 和 $\alpha(k_x,z,\omega)$ 进行相位迁移得到深度 z 平面的二维频谱 $P(k_x,z,\omega)$；

步骤 5：根据 $P(k_x,z,\omega)$ 和式(9)获得深度 z 平面的成像矩阵 $I(x,z)$；

步骤 6：$z=z+\Delta z$，重复步骤 2 至步骤 5，直至获得整个成像范围内的聚焦成像矩阵。

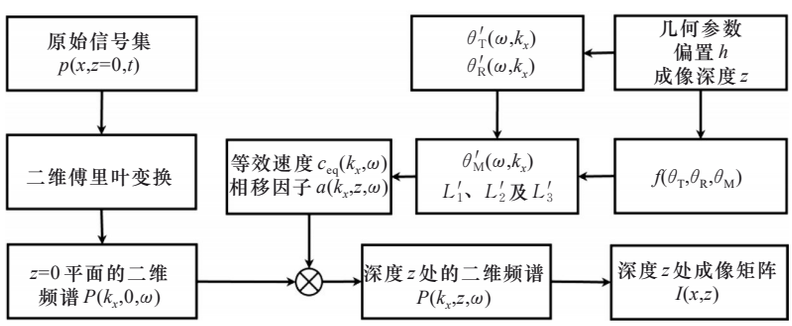


图 5　深度 z 平面成像矩阵计算流程图

Fig. 5　Depth z plane imaging matrix calculation flow chart

3　成像结果讨论

3.1　点目标扫查信号的获取及偏置 h 对信号横坐标 x 的影响

本文通过两个模拟点目标的例子来说明当激发点和检测点之间偏置距离 h 时，传统 PSM 算法的成像误差分布规律与由数值计算方法得等效速度 c_{eq} 改进的 PSM 算法成像性能差异。如图 3 所示，激光超声检测系统扫查时，激发点和检测点相距 h 不变，以 Δx 的步距沿 x 方向步进扫查。为获得点目标在所有扫查位置上的信号，必须计算时间延迟，设第 i 个检测位置检测点的坐标为 $(x_i,0)$，则对应激发点的坐标为 $(x_i-h,0)$。设点目标 O 坐标为 (x_0,z_0)，则时间延迟 t_i 可由下式计算：

$$t_i=\frac{\sqrt{(x_i-x_0)^2+z_0^2}+\sqrt{(x_i-h-x_0)^2+z_0^2}}{c}\tag{14}$$

将提取的信号波(如纵波)迁移至时间序列 t_i 处即可获得第 i 个扫查位置上收集到的点 O 的回波信号。在每一个扫查位置均做上述时间延迟计算和波形迁移即可获得点目标扫查信号集 $p(x,z,t)$。图 6 即为横坐标 x=6.4 mm，深度坐标 z=1 mm 时的点目标扫查 B 扫描图。图 6 中水平方向坐标 x 由检测点的位置确定。从图 6 中可以看出点目标扫查结果呈现出双曲线形状。双曲线的顶点表示点目标反射超声波的声路最短的检测位置。在激发点和检测点重合的情况(h=0)下，双曲线顶点位置就是缺陷点的位置。h 不等于 0 的情况下，点目标的 B 扫描图顶部更平，被称作平顶双曲线。平顶双曲线的顶点位置比 h=0 mm 情况下更深，且水平坐标与缺陷点的水平坐标相差 $h/2$。PSM 算法是一种聚焦算法，对点目标而言数据经过 PSM 算法处理，B 扫描图中的双曲线会聚焦为一个与曲线顶点对应的点。聚焦后的缺陷点图像横坐标与曲线顶点横坐标相同，纵坐标则与所用的等效速度有关。因此在

激发点和检测点不重合的情况下，缺陷成像的深度位置可通过本文第2节所述c_{eq}计算方法修正，而横坐标则需要通过将横坐标减去$h/2$修正。

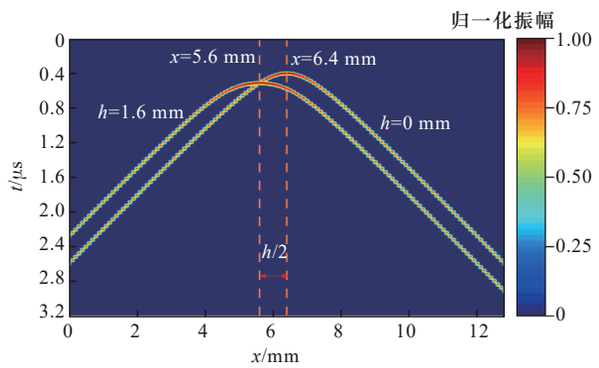
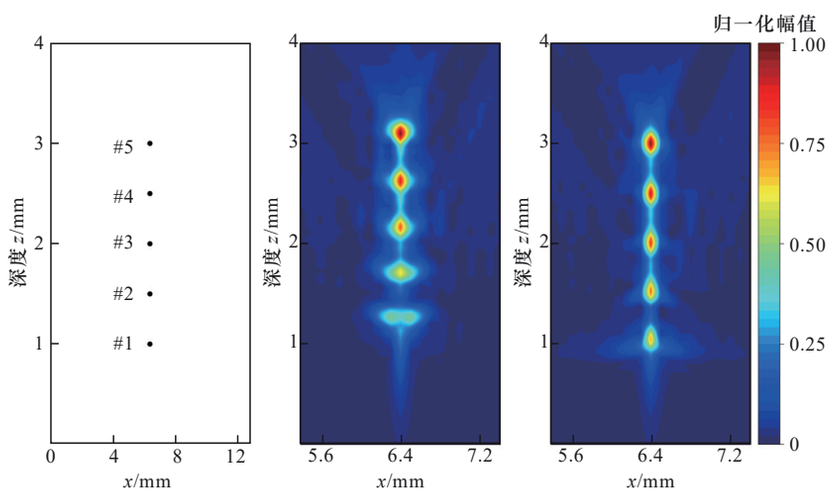


图6 点目标扫查B扫描图

Fig. 6 Point target scan B-scan image

3.2 垂直分布的点目标成像

如图7所示，模拟具有5个垂直缺陷点的情况。成像范围为水平方向0～12.8 mm，深度方向0～4 mm，扫查步距Δx=0.1 mm，偏置距离h=1.6 mm，c=5 000 m/s。缺陷分布如图7(a)所示，传统PSM算法($c_{eq}=c/2$)成像结果如图7(b)所示，利用本文提出的改进的PSM算法(c_{eq}通过数值计算的方法得出)成像结果如图7(c)所示，成像矩阵均经过归一化处理，水平方向坐标均经过修正。模拟的5个点均位于直线x=6.4 mm上，深度坐标z分别为1、1.5、2、2.5和3 mm。对比图7(a)和图7(b)，传统PSM算法成像的5个点的z坐标均深于实际位置而且呈现出实际深度越浅，成像深度误差越大的趋势。图7(b)中5个点目标成像均具有不同程度的拖尾，而且深度越浅聚焦效果越差。图7(c)显示使用改进的PSM算法，深度方向的成像误差已被很好地修正，基本与实际位置相吻合，5个点也得到了很好的聚焦。



(a)模拟点目标分布图 (b)传统PSM成像 (c)改进PSM成像

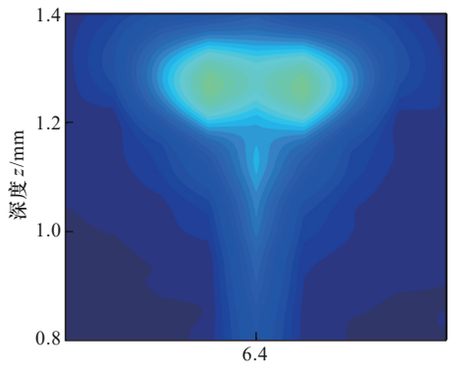
图7 点目标分布模型及成像对比

Fig. 7 Point target distribution model and imaging comparison

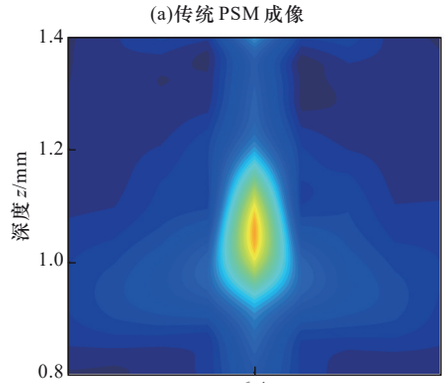
为进一步对比传统PSM算法与改进PSM算法的聚焦性能，现单独对深度1 mm进行成像，结果如图8所示。当处理激发点和检测点分离的数据时，可以看到传统PSM成像聚焦效果差，有两个峰值，这会对缺陷的位置和形状识别造成干扰。改进的PSM算法成像回波信号被很好地聚集为1个点，且最大振幅要比传统PSM成像振幅高。应用改进的PSM算法成像的聚焦效果更好。

本研究采用品质因子$Q=\rho_{max}/\sigma$评估传统PSM算法和本文所提出的改进的PSM算法获得图像的聚焦能力。其中ρ_{max}代表缺陷成像区域的最大振幅，σ代表幅值高于ρ_{max}一半的区域长度，用于指示缺陷区域成像的大小，σ可分为沿x方向的σ_x和沿z方向的σ_z。对于点目标的缺陷成像而言，最大振幅ρ_{max}越大，缺陷成像区域σ越小，品质因子Q越大，聚焦效果越好。由图7(b)和(c)可分别计算出传统PSM算法和改进的PSM算法在两个方向上的品质因子Q_x和Q_z，计算结果如表1所示。从表1中可以看出对于垂直分布的点目标，改进的PSM的聚焦效果普遍优于传统PSM算法。

将图7(a)中的模型视为标准模型，在h分别取0.8、1.2、1.6 mm时使用两种方法进行成像，并提取5个点目标的峰值深度z坐标，结果如图9所示。从图9中可以看出，传统算法的成像深度与实际深度相比较深，改进的PSM算法成像深度更贴合实际深度。随着h增加，传统的PSM算法的成像误差变



(a)传统 PSM 成像



(b)改进的 PSM 算法成像

图 8　深度 1 mm 点目标成像对比

Fig. 8　Comparison of point target imaging with a depth of 1 mm

表 1　垂直分布点目标聚焦成像品质因子 Q

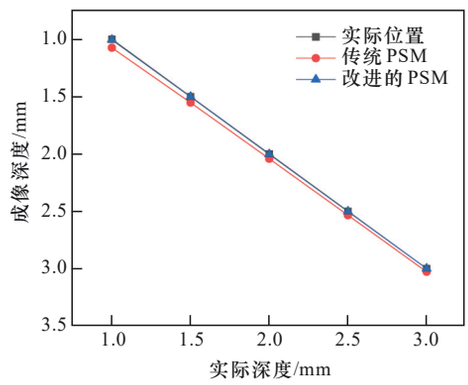
Table 1　Quality factor Q of vertically distributed point target focusing imaging

序号	传统 PSM 算法		改进的 PSM 算法	
	Q_x/(mm^{-1})	Q_z/(mm^{-1})	Q_x/(mm^{-1})	Q_z/(mm^{-1})
#1	1.02	0.81	5.65	2.89
#2	2.09	2.70	6.04	2.97
#3	4.34	3.15	7.23	3.20
#4	5.39	3.56	7.80	3.77
#5	6.02	4.59	7.63	4.46

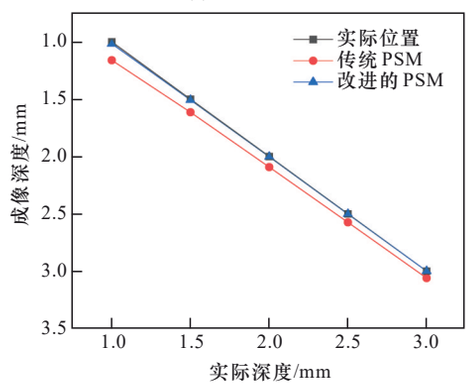
大。改进的PSM算法成像误差具有同样的趋势，但是成像误差很小，在 h=1.6 mm，深 1 mm 的成像误差约为 0.05 mm，可以忽略不计。在同样的条件下传统 PSM 算法的成像误差约为 0.28 mm，这会造成严重的缺陷定位误差。从图 9 中还可以看出，无论 h 取何值，点目标的实际深度越深，两种方法的成像误差越小。总结两种成像方法成像深度误差的规律为：h 越大，成像误差越大；缺陷的实际深度越深，成像误差越小。但改进的 PSM 的成像误差很小，不会影响缺陷定位。

3.3　弧形分布的点目标成像

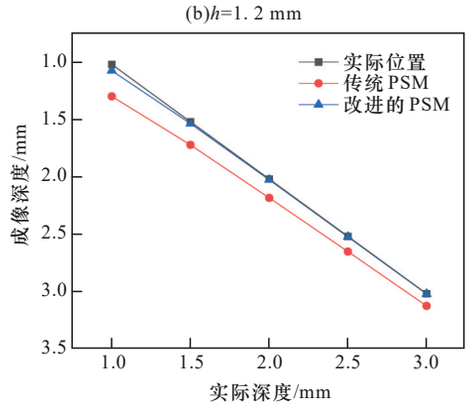
第一个模拟模型中点目标沿垂直的直线分布，



(a)h=0.8 mm



(b)h=1.2 mm



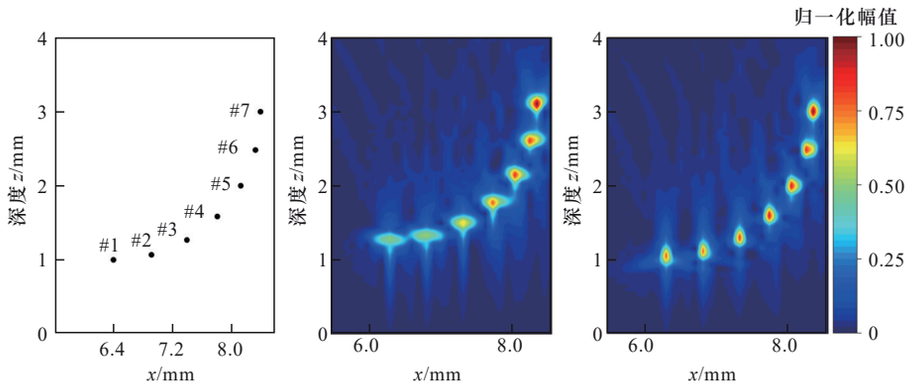
(c)h=1.6 mm

图 9　实际位置与成像位置对比图

Fig. 9　Comparisons between actual position and imaging position

第二个模型中的参数设置与第一个模型相同，只是点目标分布在以(6.4，3)为圆心、半径 2 mm 的四分之一圆上。每个缺陷点相差 15°，共有 7 个缺陷点，如图 10(a)所示。图 10(b)为传统 PSM 成像，与垂直分布的缺陷点模型相同，点目标成像具有较大的深度误差，且有拖尾，深度越浅聚焦效果越差。图 10(c)中利用改进的 PSM 算法聚焦的图像中，所有的点目标均得到了很好的聚焦，能够正确地反映缺陷点的位置，这证明了本文所提出的改进的 PSM 算法的有效性。在两个点目标模拟成像的例子中改进 PSM 算法成像效果均优于传统 PSM 算法。由图 10(b)和(c)可分别计算出传统 PSM 算法和改进的

PSM算法在两个方向上的品质因子Q_x和Q_z，计算结果如表2所示。从表2中可以看出对于弧形分布的点目标，改进的PSM的聚焦效果普遍优于传统PSM算法。



（a）模拟点目标分布图 （b）传统PSM成像 （c）改进PSM成像

图10 点目标分布模型及成像对比

Fig. 10 Point target distribution model and imaging comparison

表2 弧形分布点目标聚焦成像品质因子Q

Table 2 Quality factor Q of arc-shaped distribution point target focusing imaging

序号	传统PSM算法		改进的PSM算法	
	Q_x/(mm^{-1})	Q_z/(mm^{-1})	Q_x/(mm^{-1})	Q_z/(mm^{-1})
#1	0.97	1.29	6.11	3.23
#2	1.03	1.49	5.72	3.31
#3	2.06	1.41	6.61	3.68
#4	2.71	2.90	6.19	4.12
#5	3.65	3.75	5.29	4.15
#6	3.21	3.98	4.62	4.02
#7	5.92	4.85	7.46	4.59

4 结语

为将相移迁移算法推广至激光超声检测领域以提高成像质量和检测水平，本文提出一种基于数值计算的等效速度c_{eq}的PSM改进算法。由于激光超声检测过程中激发点和检测点不重合，传统等效速度固定等于$c/2$的PSM算法不再适用。为解决这一问题，研究了频率-波数域内等效速度c_{eq}的数值计算方法。利用模拟的点目标信号集来验证改进PSM算法的有效性并研究传统PSM算法成像误差随激发点和检测点之间距离偏置h和成像深度z的变化规律。成像结果表明h越大，z越小，两种成像方法的成像误差就越大，但改进的PSM的成像误差很小（h=1.6 mm、深度1 mm的点目标定位误差约为0.05 mm），不会影响缺陷的识别和定位。该方法适用于激光超声检测中激发点和检测点分离的情况，但是当激发点和检测点之间的偏置距离h过小或成像深度较深时，改进的PSM算法和传统PSM算法的成像效果接近。最后在垂直分布和弧形分布的点缺陷成像中，改进的PSM算法聚焦效果良好，缺陷的成像位置精确，充分验证了该方法的有效性。

参考文献：

[1] 徐桂荣，刘甜甜，关雪松，等.航空产品磁粉检测与渗透检测分析[J].兵器材料科学与工程，2021，44(6)：123-127.

[2] Chen Y，Feng B，Kang Y，et al.A novel thermography-based dry magnetic particle testing method[J].IEEE Transactions on Instrumentation Measurement，2022，71：1-9.

[3] 武新军，张卿，沈功田.脉冲涡流无损检测技术综述[J].仪器仪表学报，2016，37(8)：1698-1712.

[4] 刘松平，刘菲菲，李乐刚，等.航空复合材料无损检测与评估技术研究进展回顾[J].航空制造技术，2019，62(14)：14-27.

[5] Saeedifar M，Zarouchas D.Damage characterization of laminated composites using acoustic emission：A review[J].Composites Part B：Engineering，2020，195：108039.

[6] 曹海洋，张玉成，朱启伟，等.基于红外成像技术的变压器热故障在线检测与诊断[J].实验室研究与探索，2012，31(2)：30-32，40.

[7] 杨红娟，杨正岩，杨雷，等.碳纤维复合材料损伤的超声检测与成像方法研究进展[J].复合材料学报，2023，40(8)：4295-4317.

[8] Kou X，Pei C X，Liu T，et al.Noncontact testing and imaging of internal defects with a new Laser-ultrasonic SAFT method[J].Applied Acoustics，2021，178：107956.

[9] 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)：148-158.

[10] Ying K N, Ni C Y, Dai L N, et al. Multi-mode laser-ultrasound imaging using Time-domain Synthetic Aperture Focusing Technique (T-SAFT)[J]. Photoacoustics, 2022, 27: 100370.
[11] 何志同，应恺宁，戴鹭楠，等. 基于压缩感知的快速激光超声合成孔径聚焦技术[J]. 中国激光，2024，51(2)：36-46.
[12] 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)：269-275.
[13] 刘建全，张海燕，徐梦云. 钢轨缺陷的超声相控阵波数成像算法[J]. 应用声学，2018，37(6)：835-842.
[14] Moghimirad E, Villagomez Hoyos C A, Mahloojifar A, et al. Synthetic aperture ultrasound fourier beamformation using virtual sources[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(12): 2018-2030.
[15] 陈尧，冒秋琴，石文泽，等. 基于虚拟源的非规则双层介质频域合成孔径聚焦超声成像[J]. 仪器仪表学报，2019，40(6)：48-55.
[16] Chang J, Chen Z, Luo W, et al. Extended non-stationary phase-shift migration for ultrasonic imaging of irregular surface component[J]. IEEE Access, 2020, 9: 3004-3015.
[17] Lukomski T. Non-stationary phase shift migration for flaw detection in objects with lateral velocity variations[J]. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2014, 56(9): 477-482.
[18] 陈楚，应恺宁，刘念，等. 相移迁移法在激光超声合成孔径聚焦技术中的应用[J]. 中国激光，2021，48(3)：31-41.
[19] 赵扬，李鹏，张鹏辉，等. 基于 PSM 算法的激光致声 SAFT 水下小目标探测方法[J]. 中国激光，2022，49(9)：16-27.
[20] Zhang Y, Zhang F, Zhang W, et al. Laser-induced ultrasound imaging of multi metal laminate with complex interface[J]. Materials & Design, 2023, 232: 112095.
[21] Ni C Y, Chen C, Ying K N, et al. Non-destructive laser-ultrasonic synthetic aperture focusing technique (SAFT) for 3D visualization of defects[J]. Photoacoustics, 2021, 22: 100248.
[22] Dai L N, Ni C Y, Ying K N, et al. Defect imaging based on laser ultrasonic frequency domain synthetic aperture focusing technology with separated generation-detection and 2-D equivalent velocity mapping[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 156: 108485.
[23] Dai L N, Ni C Y, Ying K N, et al. Laser ultrasonic imaging of defect in bimetallic media with frequency domain synthetic aperture focusing technology[J]. NDT & E International, 2024, 141: 103003.
[24] Hunter A J, Drinkwater B W, Wilcox P D. The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, 55(11): 2450-2462.

（编辑：贾丽红）