

基于激光超声的矩形缺陷合成孔径成像方法 仿真研究

何力*, 郭华玲

中北大学电气与控制工程学院, 山西 太原 030051

摘要 目前,激光超声合成孔径聚焦技术(SAFT)对内部缺陷的成像检测应用越来越多,对内部缺陷的成像质量要求也越来越高。基于合成孔径后处理成像方法,提出一种激光超声模式波在信号的多融合预处理技术下的成像优化方法,以实现对试件内部矩形缺陷的高质量检测。对采集的激光超声模式波依次进行差分计算、模式波包络提取、包络极大值线性插值、均值化去伪像的处理,再选取处理过的模式波进行 SAFT 成像。与未预处理的模式波成像结果的对比表明:后处理成像方法对缺陷的纵向深度探测误差平均降低了 2.37%,横向宽度的检测误差平均降低了 30.88%,使得缺陷的尺寸和位置判别更准确;成像质量显著提升,描述成像质量的能量梯度(EOG)函数平均值是预处理前的 1.88 倍。该后处理成像方法实现了对内部缺陷位置的定性精准判别、对尺寸的精准检测及高质量成像,为激光超声内部缺陷的检测方法提供了一种可能更优的后处理方案。

关键词 激光超声; 合成孔径聚焦成像; 多融合预处理; 成像优化; 缺陷检测

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231898

Simulation Study on Synthetic Aperture Imaging Method for Rectangular Defects Based on Laser Ultrasound

He Li*, Guo Hualing

School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China

Abstract Currently, laser ultrasonic synthetic aperture focusing technology (SAFT) is being increasingly used for imaging and detecting internal defects. A method, based on the synthetic aperture postprocessing imaging methods, for achieving high-quality detection of rectangular defects inside a specimen is proposed using laser ultrasonic mode wave imaging optimization under multifusion preprocessing signal technology. Differential calculation, envelope extraction of signals, linear interpolation of maximum values, and removal of artifacts using the mean value are performed on the detected laser ultrasonic mode waves, and then we select the processed mode waves for SAFT imaging. The comparison with the imaging results from mode waves without prior processing indicates that the postprocessing imaging method can accurately and qualitatively identify defects. Furthermore, errors in longitudinal depth detection and transverse width detection of defects are reduced by 2.37% and 30.88%, respectively, improving the accuracy of defect size and their location determination. Thus, the imaging quality is considerably improved, as evidenced by a 1.88-fold increase in the average value of the energy gradient (EOG) function, which characterizes imaging quality. This postprocessing imaging method achieved qualitative and accurate identification of internal defect positions, precise size detection, and high-quality imaging, providing a promising postprocessing solution for laser ultrasound-based internal defect detection methods.

Key words laser ultrasound; synthetic aperture focusing imaging; multi-fusion preprocessing; imaging optimization; defect detection

1 引言

激光超声无损检测是一种非接触、高精度、无损伤

的新型超声检测技术。其利用激光脉冲以热弹效应或烧蚀效应对被检测工件激发出不同模式的超声波信号,通过接触或非接触式地接收传播后的超声波,获取

收稿日期: 2023-08-11; 修回日期: 2023-09-03; 录用日期: 2023-10-09; 网络首发日期: 2023-11-07

基金项目: 信息探测与处理重点实验室基金(ISPT2020-6)

通信作者: *89737194@qq.com

工件信息和缺陷表征,是利用光学或非光学方法实现超声检测的一种无损检测技术^[1-3]。随着检测技术发展,利用激光超声的聚焦实现对试件内部缺陷的成像成为一种更加准确的缺陷检测方法,其中合成孔径聚焦技术成为目前应用比较广泛的内部缺陷聚焦成像技术^[4]。

合成孔径聚焦技术起源于雷达合成孔径技术^[5]。20 世纪 60 年代研究人员将雷达中的合成孔径概念应用于超声成像领域^[6],通过小孔径和低工作频率换能器即能获得高分辨率的图像,于是合成孔径聚焦技术(SAFT)算法思路逐渐引入至激光超声无损检测领域。1993 年,孙宝申等^[7-9]首次向国内引入合成孔径聚焦超声成像的概念。激光超声 SAFT 成像能实现对试件内部缺陷的定位和定量,随着技术的不断成熟,SAFT 在激光超声方面的应用也越来越多。Yoon 等^[10]运用一种时域合成孔径聚焦技术(T-SAFT)过程中的声速,采用曲线拟合的方法对声速进行原位提取,实现对目标物体的深度位置确定。Jiang 等^[11]通过建立激光 SAFT 算法的数学模型,提出一种基于波模和飞行时间的去伪方法,完成了对 AM 316L 钢内部缺陷的定量检测。Ruiz-Veloz 等^[12]提出一种基于单传感器扫描 SAFT 实现了一种基于延迟和波束形成的圆形扫描激光诱导超声成像的方法,并且证明了该方法具有较好的性能和较少的计算量,并讨论了其在光声显微图像重建技术中的应用。

随着技术的发展,对内部缺陷检测的成像质量要求越来越高,SAFT 的传统延迟聚焦算法逐渐不能满足行业发展要求,缺陷的成像会出现尺寸大小不精准、成像质量差等缺点,一些传统延时算法受限于庞大的数据库,造成 SAFT 成像效率低下。一些学者针对传统的 SAFT 成像,从算法或者仪器等方面上提出了一些改进型的 SAFT 成像方法。Kou 等^[13]利用大功率非聚焦激光源在具有约束层的样品表面辐照产生强超声平面波,

再将信号相关性算法应用于激光超声 SAFT 成像,提高了成像精度。Hu 等^[14]提出了一种基于差分技术的优化合成孔径成像方法,实现了对内部缺陷的有效检测。陈楚等^[15]提出了一种基于相移迁移法的 SAFT 成像算法,该算法能够有效地对微小缺陷进行检测和定位,且图像重构速度较快。但是,超声激发过程会产生多种模式波,在成像过程中一些高幅值的模式波会聚焦叠加在成像区域,产生伪像,导致缺陷的成像淹没在这些杂波中;另外根据激光超声的方向性和在介质中传播的波动特性,用于成像的模式波在不同方向上存在信号拖尾以及较大的正负值波动。这些现象都会对缺陷的尺寸判别、精准定位和成像质量产生影响。

因此,需要研究一种提高成像质量的 SAFT 成像优化方法实现对缺陷的可靠检测。本文提出一种基于信号的多融合预处理方法,对超声模式波信号依次进行差分计算、模式波包络提取、包络极大值线性插值、均值化去伪像的预处理,之后再对模式波进行 SAFT 成像,从而实现了对内部缺陷的成像反差和尺寸位置的精准判别。

2 SAFT 成像原理

激光超声 SAFT 成像的基本思想是脉冲激光激发超声信号的测量机制。传统的 SAFT 需要在工件表面同点激发探测回波超声信号,基本原理如图 1(a)所示,其中 E 和 D 分别为激励点和探测点,激光激励点产生超声波,探测点接收回波,这两点为表面的同一位置 (x_i, z_0) , L_i 为探测点到聚焦位置的距离。以给定的步长 Δx 扫描样品表面,D 点在接收反射回波的过程中会受到样品表面激光辐照的热膨胀影响,给回波信号分析带来困难。图 1(b)为改进的激光超声 SAFT 法,采用异点激发^[16]进行探测扫描,即激发、扫描点分离,可有效降低表面热膨胀对探测信号的影响, h 为激发点到聚焦位置的距离。

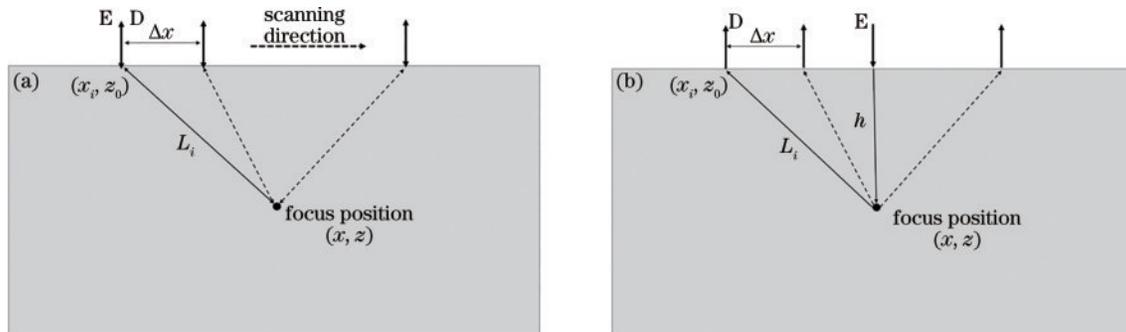


图 1 超声波成像模型。(a)传统激光超声 SAFT 法;(b)改进激光超声 SAFT 法

Fig. 1 Ultrasonic imaging models. (a) Traditional laser ultrasound SAFT method; (b) improved laser ultrasound SAFT method

基于图 1 的模型,改进的超声 SAFT 法对应的小孔径等效合成孔径的原理如图 2 所示。根据各成像点的空间位置,对接收到的信号进行适当的声时延后再合成得到的被成像物体的逐点聚焦声像,该过程就是

合成孔径成像技术。当探测点移到第 i 点时,它在以前一系列点上接收到的声波等效于线阵列的阵元延时辐射的声场。这样,单个探测点的运动及其整个路径就合成为一个大尺度的合成孔径阵列,大孔径的分辨

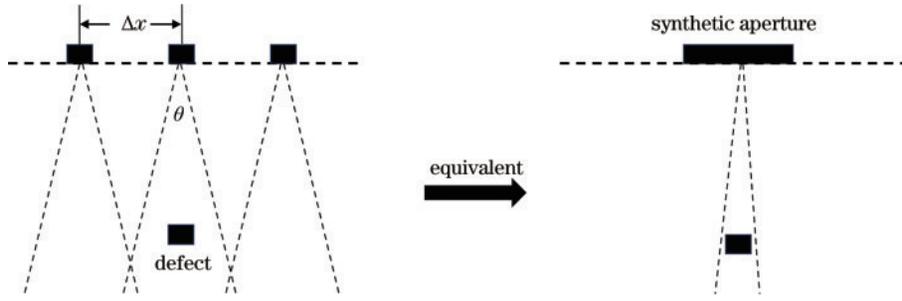


图 2 等效合成孔径原理图

Fig. 2 Schematic of equivalent synthetic aperture

率也变大。如图 2 所示,每隔 Δx 探测接收成像区域各点的散射声波,其探测区域为激光超声横波的方向性角度 θ 范围内,探测点远离缺陷位置时,受方向性限制,探测不到缺陷反射波,所以下文中按照方向性选择合适的扫描范围,等效的合成孔径阵列内的间距 Δx 根据仿真模型的有限元大小及其成像质量设置。

选用图 1(b)改进后的 SAFT 成像模型,成像区域位于扫描表面下,设置缺陷聚焦位置为 (x, z) ,激光超声激励点为 (x_0, z_0) ,扫描点数为 N ,则成像区域内缺陷成像位置处的振幅 F 为

$$F(x, z) = \sum_{i=1}^N S_i(t_i - \Delta t_i), \quad (1)$$

式中: S_i 为各探测点接收到的时域波形信号幅值。成像区域其他位置的成像聚焦方法与缺陷位置成像聚焦方法相同,超声信号经过缺陷到达探测点的时间为 t_i ,表达式为

$$t_i = \frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (z-z_i)^2}}{v_2}, \quad (2)$$

式中: v_1 和 v_2 分别为超声波经过缺陷后模式转换前后的波速,若不发生模式转换则 $v_1 = v_2$ 。探测点 i 与其他探测点 j 之间的时延^[17]为

$$\Delta t_i = \frac{L_i - L_j}{v_2}, \quad (3)$$

式(3)就是 SAFT 成像的传统核心算法:延时叠加算法(DAS)。DAS 通过对不同的探测点接收到的超声回波信号进行延时后再相加,得到目标位置的成像聚焦信号。将各个成像聚焦信号延时叠加,得到成像区域的二维成像图。但是传统的 DAS 的成像结果不清晰,且未处理的时域波形信号对成像结果有一定程度的影响。所提优化方法从几个方面对各探测点的接收信号进行预处理,对 SAFT 的成像方法进行优化,得到高质量的缺陷成像结果。

3 激光超声理论和模型

为了对改进的异点激发探测扫描的激光超声 SAFT 成像法进行验证,基于 COMSOL 软件进行有限元建模和数值模拟。根据线性热弹性基本理论,材

料的热传导方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q, \quad (4)$$

式中: ρ 为材料密度; c 为比热容; T 为温度矢量; K_x 、 K_y 、 K_z 为对应坐标轴方向的热传导系数; Q 为热源。材料对激光能量的吸收可以看成是加载在模型表面的热边界条件,表达式为

$$Q = I_0 A(T) f(r) g(t), \quad (5)$$

式中: I_0 为入射激光的最大功率密度; $f(r)$ 和 $g(t)$ 为脉冲激光的空间和时间分布,激光的时空分布符合高斯分布; $A(T)$ 表示光的吸收系数。其中 $f(r)$ 和 $g(t)$ 的表达式为

$$f(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{a_0^2}\right), \quad (6)$$

$$g(t) = \frac{t}{t_0} \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right), \quad (7)$$

式中: a_0 和 t_0 分别为激光光斑半径和激光脉冲上升时间。由于温升的不均匀,在材料内部产生应变,激发出瞬态位移场,在介质中形成超声波。位移场满足

$$(\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{U}) - \mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{U} - \rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} = \boldsymbol{\alpha}(3\lambda + 2\mu) \nabla T, \quad (8)$$

式中: \mathbf{U} 为位移矢量; $\boldsymbol{\alpha}$ 为热膨胀系数矩阵; ∇ 为矢量的微分运算; λ 和 μ 为 Lamé 常数^[18-19]。

在内部缺陷的形状和大小的选择上:对于形状选择,对比了矩形和圆形缺陷探测的波形信息,如图 3 所示,发现两者的波形幅值相差 1 倍左右,且圆形缺陷的一些模式波存在和成像波形等幅度的严重拖尾以及杂波的叠加,都不利于后续的缺陷成像质量;对于缺陷大小选择,缺陷越宽则越靠近缺陷边界处的反射波传播距离越长,波形幅值的能量损耗越大,而且整体数值研究模型也需要更大,极大增加了模型的计算时长,若缺陷宽度较小,对于缺陷成像也不能做到优化方法下横向的有效对比。脉冲激光在 X 方向呈高斯分布,在 Y 方向上呈均匀分布,故可将三维模型转换为二维平面的有限元模型,单缺陷的数值计算模型如图 4 所示。

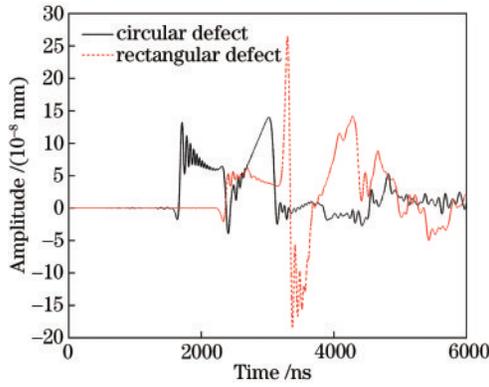


图3 矩形和圆形缺陷的波形对比

Fig. 3 Comparison of rectangular and circular defect waveforms

根据激光超声仿真实论以及合理的计算时间设置探测模型的上表面以下 X-Z 面为成像区域,大小设置为 $20\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。综合以上因素,设置一个距模型表面 5 mm 、大小为 $2\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的内部矩形缺陷。图 4 中实心圆点为探测点 (x_i, z_0) ,激励点坐标为

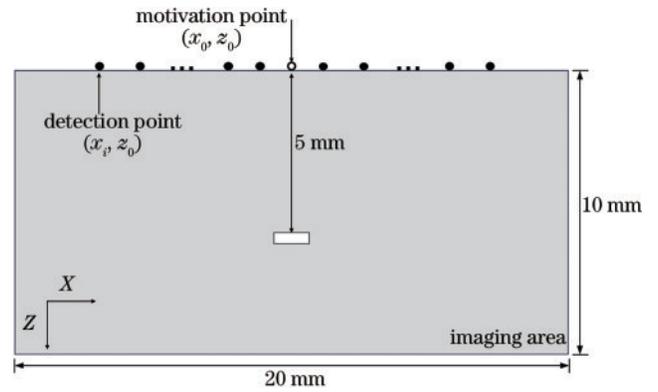


图4 单缺陷数值计算模型示意图

Fig. 4 Schematic of single defect numerical calculation model (x_0, z_0) ,根据仿真模型的参数设置以及合理的计算时长,结合 SAFT 原理,设置扫描步长 $\Delta x = 0.1\text{ mm}$,其中 i 为 $1 \sim 100$ 的整数,即 $N = 100$ 。

选用结构钢为模型材料,其材料属性如表 1 所示。

表1 结构钢材料的属性

Table 1 Properties of structural steel material

Parameter	Thermal conductivity / $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Thermal expansion coefficient / K^{-1}	Density / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Young's modulus / Pa	Poisson's ratio
Value	44.5	12.3×10^{-6}	7850	200×10^9	0.3

激光加载在模型上表面,热源 Q 作为边界条件,模型的左、右、下表面设置为低反射边界,避免边界对缺陷反射信号的干扰。再对模型进行网格剖分,激励点附近设置为过渡型网格,缺陷四周设置为三角形网格,靠近左右边界处设置映射网格,其余区域设置为四边形网格,这样保证了计算精度和计算时间,图 5 为网格剖分示意图。

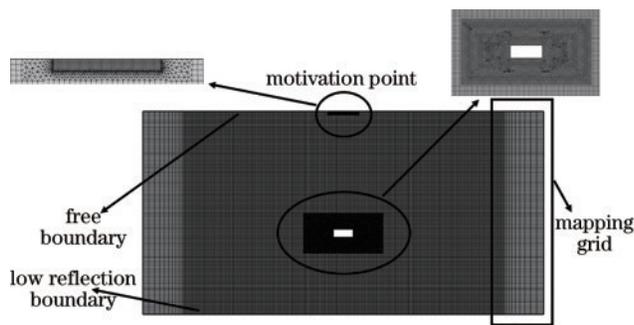


图5 网格剖分示意图

Fig. 5 Schematic of grid division

4 探测模式波信号的多融合预处理

为了去除超声探测回波信号中的模式杂波,减少模式杂波对 SAFT 成像结果的影响,提高成像质量和对缺陷尺寸的检测精度,对成像前探测的模式波信号顺次进行差分计算、模式波包络提取、包络极大值线性插值、均值化去伪像的预处理。

4.1 差分计算

基于第 2 节,再设置一个无缺陷模型。两种模型的区别只存在是否有缺陷,其余模型数据都不改变。缺陷的成像需要对每个探测点采集到的信号进行聚焦,有、无缺陷模型的激发点右端第 75 个探测点接收到的超声信号如图 6(a) 所示。从图 6(a) 中可以看到多种模式的超声波,即掠面纵波 (SP) 和表面波 (R),以及缺陷处反射的模式转换波,即纵波转纵波 (LL)、横波转纵波 (SL)、横波转横波 (SS) 和边界反射杂波 (C)。而携带缺陷信息的为缺陷处的反射模式波,图 6(a) 中,SP 和 R 的幅值较大,成像时会对缺陷的位置辨别产生误差,故将有、无缺陷模型在 $N = 75$ 处探测的回波信号幅值作差分计算,剔除掉 SP 和 R,得到如图 6(b) 所示的差分超声信号。从图 6(b) 中明显看到去除了 SP 和 R,保留了携带缺陷信息的反射模式波。为了清晰地看到携带缺陷信息的回波,利用所有探测点采集的回波信号,得到模型的激光超声 B 扫描图像。图 7(a) 为单缺陷模型的 B 扫图,可以发现 SP 和 R 幅值远大于其他模式波,图 7(b) 为差分信号 B 扫图,过滤掉了高幅值的 SP 和 R,从 $2\text{ }\mu\text{s}$ 附近开始反射模式波清晰可见,再选取携带缺陷信息的模式波进行 SAFT 缺陷聚焦成像。

4.2 模式波包络提取

得到差分计算的模式波后,由于超声信号的方向性,缺陷处反射模式波拖尾严重,为精确提取模式波携

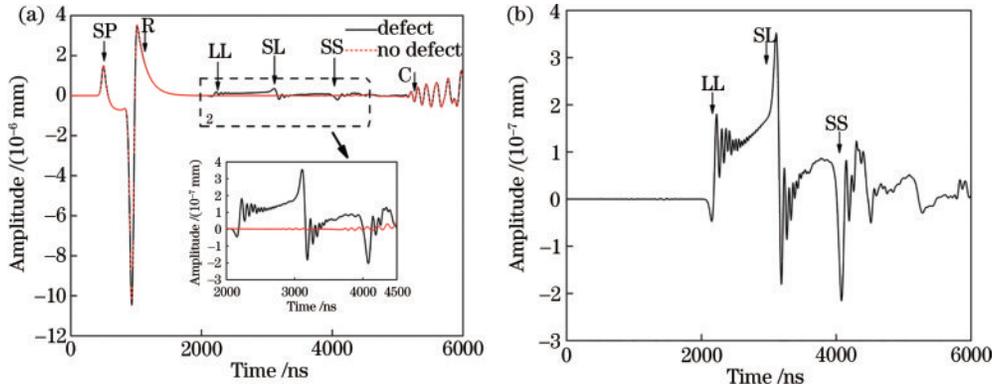


图 6 $N=75$ 处有、无缺陷模型探测的差分前后超声信号。(a) 差分前超声回波信号; (b) 差分超声信号

Fig. 6 Differential pre and post ultrasound signals detected by defect model and defect free model at $N=75$. (a) Differential pre ultrasound echo signal; (b) differential ultrasound signal

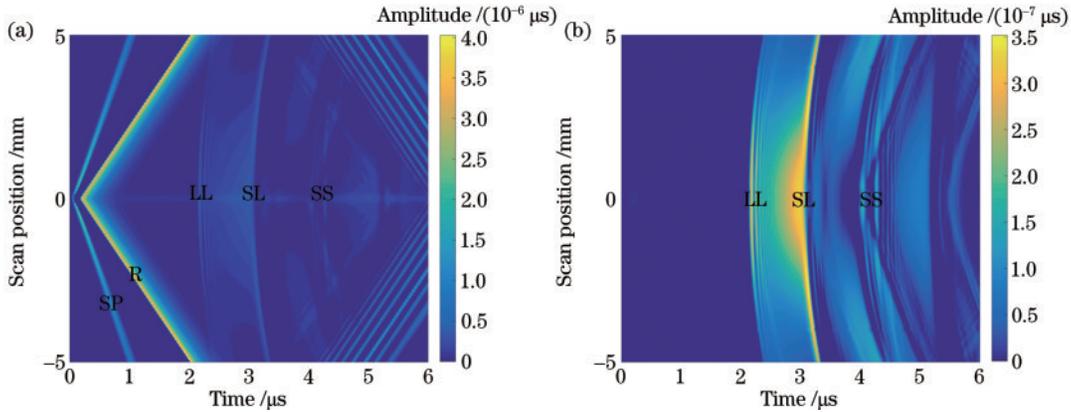


图 7 幅值差分计算前后的 B 扫图。(a) 有缺陷模型的 B 扫图; (b) 差分信号 B 扫图

Fig. 7 B-scan before and after signal amplitude difference calculation. (a) B-scan of defective model; (b) differential signal B-scan

带缺陷信息的部分, 基于希尔伯特变换对差分计算后的模式波提取包络^[20]。信号的希尔伯特变换实质是原信号与函数 $1/\pi t$ 的卷积:

$$\hat{x}_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x_i(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (9)$$

设探测点 i 处的差分模式波信号为 $x_i(t)$, 其经过希尔伯特变换后为 $\hat{x}_i(t)$, $\hat{x}_i(t)$ 的实部为 $\hat{x}_{ir}(t)$, $\hat{x}_i(t)$ 的虚部为 $\hat{x}_{ii}(t)$ 。则该点模式波的包络信号为

$$X_i(t) = \sqrt{|\hat{x}_{ir}(t)|^2 + |\hat{x}_{ii}(t)|^2}, \quad (10)$$

式中: $X_i(t)$ 为从探测点 i 接收到的差分模式波提取到的包络信号。

根据超声信号的波动性, 激光超声信号在幅值分布上呈正负交替, 在进行 SAFT 信号延时叠加的过程中, 正负信号的相互抵消使得缺陷的成像聚焦能力降低, 因此经希尔伯特变换提取到的包络为差分模式波的绝对值部分。图 8 为 $N=75$ 处探测的差分模式波的包络, 可以看出经希尔伯特变换, 虚部和实部的绝对值叠加, 包络信号幅值比差分模式波大, 提高了成像能力。

4.3 包络极大值线性插值法处理

基于差分模式波的希尔伯特变换, 包络信号中各

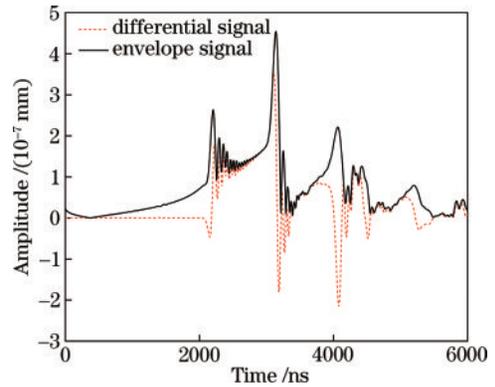


图 8 希尔伯特变换前后的对比

Fig. 8 Comparison before and after Hilbert transform

模式波仍然存在拖尾现象, 对提取的包络信号进行极大值线性插值法处理, 运用 Matlab 软件中的 findpeaks 函数, 从包络信号中寻找极大值点。首先寻找包络信号的局部极大值峰值点, 其次选取高出局部包络信号某一阈值的具有一定高度的极大值峰值点, 在寻找极大值峰值点的过程中, 采用不同的局部窗口大小和偏移量, 这样能从差分模式波的包络信号中提取出极大值峰值点。

在提取包络信号的极大值峰值点的过程中, 存在

局部信号数据点的缺失、对成像结果产生误差的问题,而且极值点峰值相对于周围局部信号幅值的差值较大时(即线性较强时),SAFT 聚焦成像的效果会更好,所以选用线性插值法^[21],对提取的极大值包络信号进行插值补充。取包络信号相邻两点的坐标为 (t_0, f_0) 和 (t_1, f_1) ,插值点坐标为 (t, f) ,则包络信号的插值函数为

$$f = \frac{t_1 - t}{t_1 - t_0} f_0 + \frac{t - t_0}{t_1 - t_0} f_1 \quad (11)$$

用 t 与 t_0 、 t 与 t_1 的距离作为一个权重,用于 f_0 和 f_1 的加权。图 9 为包络信号的极大值线性插值法处理示意图,可以看出线性插值信号不存在信号拖尾且峰值清晰明显。

4.4 均值化去伪像

图 6 的 3 种模式波中,SL 的幅值最强,故选用 SL 模式波作为成像的超声信号,其他模式波就视作杂波。对模式波的包络信号处理完成后,LL 和 SS 幅值仍较大,在成像过程中会因为 LL 和 SS 的聚焦而产生伪像,这些伪像会影响到缺陷位置的辨别,所以对包络信号进行处理后,对幅值较大的 LL、SS 和其他杂波进行均值化。

对于每个探测点处接收到的信号,取 $0.4 \mu\text{s}$ 之前

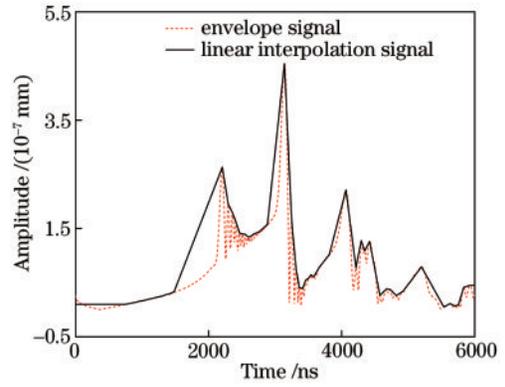


图 9 极大值线性插值法处理前后的对比
Fig. 9 Comparison before and after maximum linear interpolation processing

各个时间点处的幅值信息进行求和取均值,再将该均值代入到当前探测点接收到的 LL、SS 和反射杂波存在的时间段上,LL、SS 和其他杂波的幅值被均值所替代。图 10 为均值化处理前后的成像结果,SL 的虚线框表示实际矩形缺陷位置,其他三个虚线框为 LL、SS 和杂波聚焦所成的伪像,探测信号经过均值化处理后,得到图 10(b)所示仅由 SL 聚焦的缺陷成像。

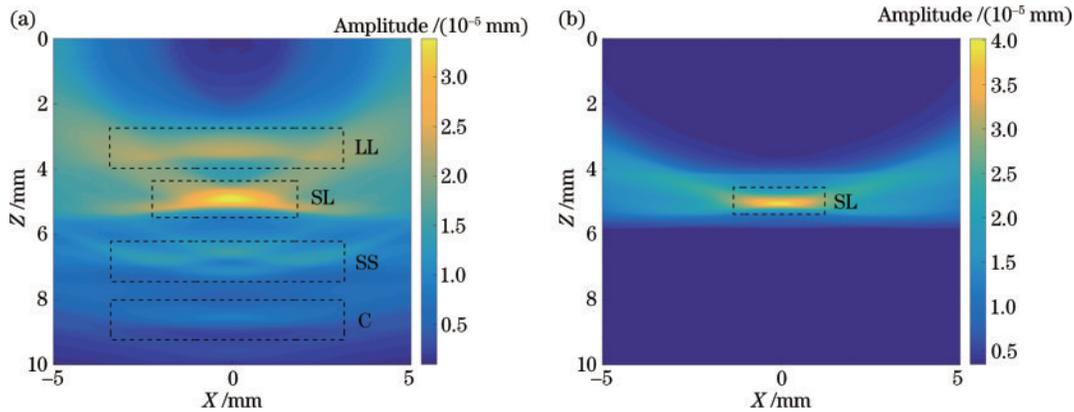


图 10 均值化处理前后的 SAFT 成像。(a) 处理前;(b) 处理后
Fig. 10 SAFT imaging before and after averaging processing. (a) Before processing; (b) after processing

5 成像结果分析

5.1 单缺陷模型的 SAFT 成像及结果对比

选用 SL 模式波对采集的 100 组回波探测信号进行成像,受点源激发的超声横波方向性限制,设置扫描范围为 $[-5 \text{ mm}, 5 \text{ mm}]$ 。每个探测点接收的波形时长为 6000 ns,时间步长为 5 ns,每个探测点接收的波形包括 1200 个特征点,那么成像区域的像素点设置为 1200×100 ,成像的横向分辨率为 0.1 mm,缺陷位置为 $(0, 5 \text{ mm})$ 。色阶的亮暗表示幅值大小,根据像素亮暗可定性确定缺陷位置。对图 4 的单缺陷模型的回波探测信号绘制 B 扫成像,如图 11(a)所示;未对模式波信号进行预处理的 SAFT 成像如图 11(b)所示;模式波信号预处理后的 SAFT 成像如图 11(c)所示。从

图 11(a)和图 11(b)可以看出,图像上半部分存在高幅值的 SP 和 R,导致缺陷的成像被淹没,不利于缺陷辨别;从图 11(c)中清晰可见亮黄区域,即缺陷的成像区域,信号预处理之后 SP、R 和其余模式波几乎不存在,对缺陷区域的成像影响明显减小。

以上对内部缺陷的成像位置进行了定性分析,接下来定量分析缺陷的纵向位置和横向宽度。由于 B 扫成像的模式波幅值分布较均匀,无明显的缺陷位置信息,对图 11(b)和图 11(c)的成像结果进行分析对比,对缺陷的纵向位置和横向宽度进行定量分析。图 12 为纵横方向上单缺陷模型在缺陷成像位置处的归一化幅值。图 12(a)为纵向深度上信号预处理前后在缺陷成像位置处的幅值分布,将两种信号的最大峰值所在深度信息标出,未预处理模型的缺陷成像的纵向深度

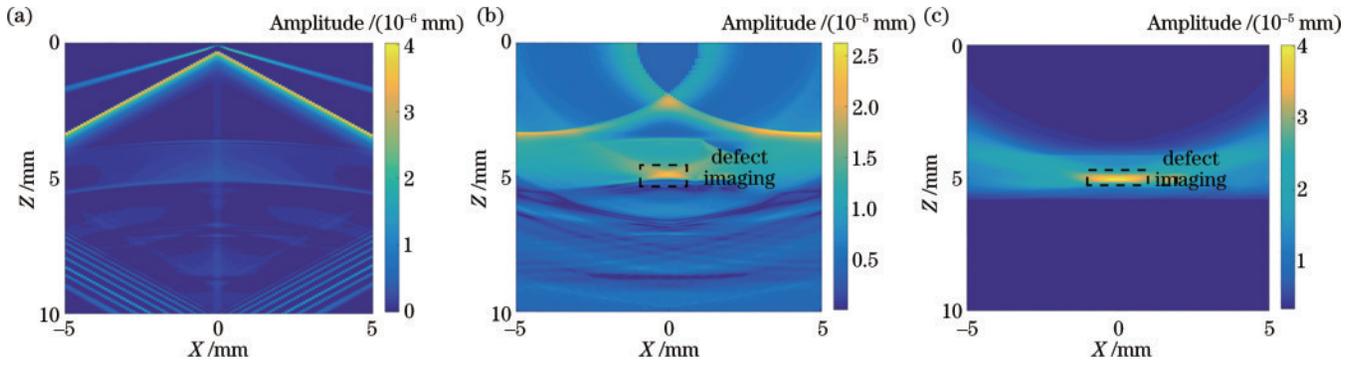


图 11 单缺陷模型的成像结果。(a)B 扫成像;(b)未预处理的 SAFT 成像;(c)预处理后的 SAFT 成像

Fig. 11 Imaging results of single defect model. (a) B-scan imaging; (b) unprocessed SAFT imaging; (c) pre-processed SAFT imaging

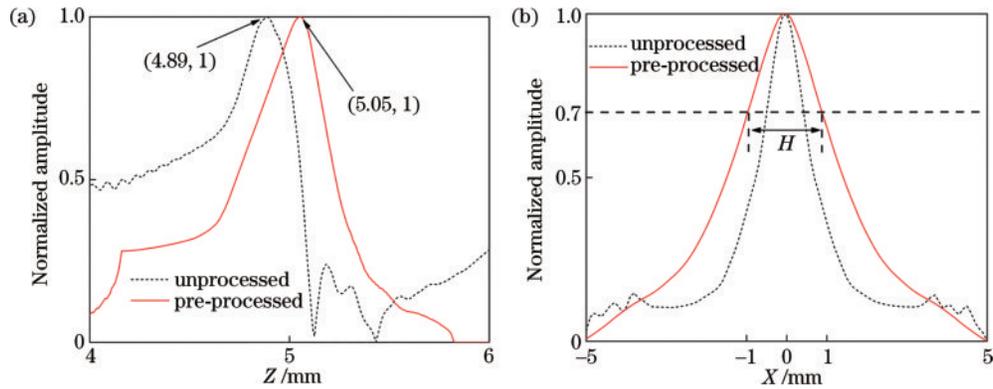


图 12 缺陷成像位置处的归一化幅值。(a)纵向深度;(b)横向宽度

Fig. 12 Normalized amplitude at defect imaging location. (a) Longitudinal depth; (b) lateral width

为 4.89 mm, 预处理模型的纵向深度为 5.05 mm, 相对实际位置误差分别为 2.2% 和 1%。图 12(b) 为横向宽度上信号预处理前后在缺陷成像位置处的幅值分布, 根据文献[22], 取最大幅值的 70% 所对应的横向分布长度 H 作为缺陷宽度的定量数值, 若取值太小成像上无法定性找出缺陷位置分布, 经计算得出未预处理模型的缺陷成像宽度为 1.12 mm, 预处理模型的成像宽度为 1.83 mm, 相比实际 2 mm 的缺陷宽度, 相对误差分别为 44% 和 8.5%。

用能量梯度 (EOG) 函数对单缺陷模型的信号预处理前后的缺陷成像进行成像质量分析, EOG 计算得到的清晰度值作为缺陷成像质量的评价值。缺陷实际大小为 2 mm × 0.5 mm, 取 EOG 的成像计算区域 4 mm × 1 mm, 对 X 和 Z 方向上所有相邻像素点的灰度值之差的平方和累加, 得到 EOG 值, 值越大说明缺陷的成像越清晰, 成像质量越好。EOG 的表达式为

$$P = \sum_x \sum_z \left\{ [g(X+1, Z) - g(X, Z)]^2 + [g(X, Z+1) - g(X, Z)]^2 \right\}. \quad (12)$$

经计算, 信号预处理前后成像的 EOG 值分别为 1.71×10^{-9} 和 3.47×10^{-9} , 预处理后的缺陷成像质量是预处理前的 2.03 倍。

5.2 多缺陷模型的 SAFT 成像及结果对比

建立多矩形缺陷模型, 进一步验证模式波预处理

下的 SAFT 成像方法的泛化性。如图 13 所示, 在模型中设置了 3 个缺陷, 分别为孔 1、2、3, 3 个缺陷到上表面的纵向深度分别为 4 mm、3 mm、3 mm, 缺陷大小分别为 1 mm × 1 mm、1 mm × 0.5 mm、1 mm × 0.5 mm。激励点、探测点的位置设置与单缺陷模型相同, 其他参数设置均不变。与单缺陷模型一样, 选用 SL 波对缺陷模型进行成像。

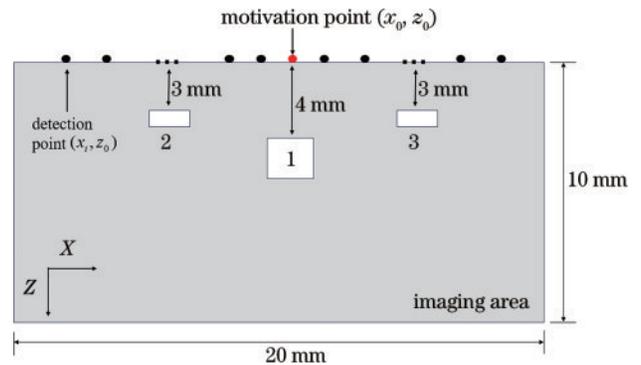


图 13 多缺陷模型示意图

Fig. 13 Schematic of multi defect model

图 14 为多缺陷模型的成像结果。从图 14(a) 的 B 扫图中几乎观察不到 SL 模式波的成像, 从图 14(b) 和图 14(c) 可见亮黄区域, 即为缺陷的成像区域, 图 14(b) 中其他模式波聚焦形成的伪像严重影响了缺陷位置的判断, 从图 14(c) 可以准确地实现对缺陷

位置的定性判别。再用 5.1 节中缺陷成像处的幅值对比方法,对图 14(b)和图 14(c)的缺陷成像结果从纵向位置和横向宽度上进行定量分析。图 15 为纵横方向上多缺陷模型在缺陷成像位置处的归一化幅值。图 15(a)为纵向深度上,信号预处理前后在缺陷成像位置处的幅值分布,未预处理模型的孔 1 和孔 2、3 的成像纵向深度分别为 3.86 mm 和 2.81 mm,预处理后成像纵向深度分别为 4.05 mm 和 2.90 mm,孔 1 深度相较于实际深度的相对误差分别为 3.5% 和 1.25%,孔 2、3 深

度相较于实际深度的相对误差分别为 6.3% 和 3.3%。图 15(b)为横向宽度上,信号预处理前后在缺陷成像位置处的幅值分布,取最大幅值的 75% 所对应的横向长度 H_1 、 H_2 、 H_3 作为缺陷宽度的定量数值,经计算未预处理模型的缺陷孔 1、2、3 的横向成像宽度分别为 0.90 mm、0.54 mm、0.55 mm,预处理后宽度分别为 1.10 mm、0.95 mm、0.92 mm。缺陷孔 1、2、3 在信号预处理前后的横向宽度相对于实际缺陷宽度的误差分别为 10% 和 10%、46% 和 5%、55% 和 8%。

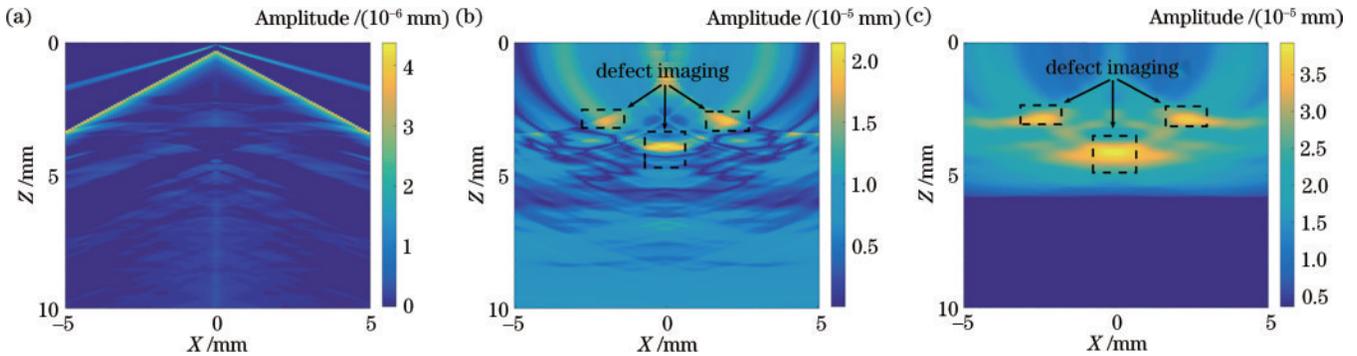


图 14 多缺陷模型的成像结果。(a)B 扫成像;(b)未预处理 SAFT 成像;(c)预处理后 SAFT 成像
Fig. 14 Imaging results of the multiple defect model. (a) B-scan imaging; (b) unprocessed SAFT imaging; (c) pre-processed SAFT imaging

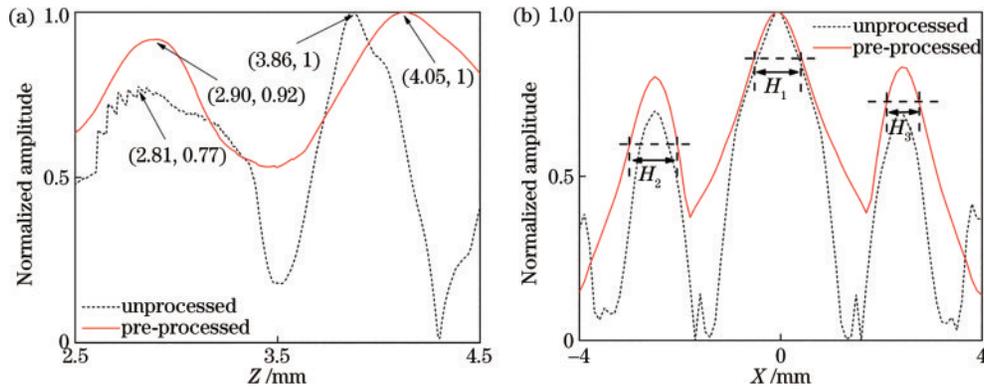


图 15 缺陷成像位置处的归一化幅值。(a)纵向深度;(b)横向宽度
Fig. 15 Normalized amplitude at defect imaging location. (a) Longitudinal depth; (b) lateral width

从图 11(c)和图 14(c)中可清晰地观测到高亮黄区域,即成像的缺陷位置,所提优化方法可准确地实现对缺陷成像的定性判别。再从缺陷的成像大小、位置和质量上进行定量分析,缺陷的成像大小、位置从纵横方向上进行判断,缺陷成像质量用 EOG 表示。两个模型的缺陷成像的横向宽度(Lw)、纵向深度(Ld)和成像质量倍数关系(multiple)的分析见下列表格内容,表 2 为实际数值与预处理前后纵向深度和横向宽度的成像数值,表 3 为预处理前后描述成像质量的 EOG 值,表 4 为预处理前后纵向深度和横向宽度的误差降幅以及成像质量 EOG 值的倍数。从表 2、3、4 中可以看出:对 SL 模式波预处理前后的成像进行对比,对缺陷在纵横方向的测量误差减小,提高了对缺陷纵向深

度探测精度,提升了对横向宽度的检测能力,使得缺陷的尺寸大小和位置判别更准确;根据 EOG 计算值,缺陷的成像质量大幅提高,预处理后的平均成像质量是预处理前的 1.88 倍。

表 2 实际数值与预处理前后纵向深度和横向宽度的成像数值
Table 2 Actual values and imaging values of longitudinal depth and lateral width before and after preprocessing
unit:mm

Condition	Single defect		Hole 1		Hole 2		Hole 3	
	Ld	Lw	Ld	Lw	Ld	Lw	Ld	Lw
Reality	5	2	4	1	3	1	3	1
Unprocessed	4.89	1.12	3.86	0.90	2.81	0.54	2.81	0.55
Preprocessed	5.05	1.83	4.05	1.10	2.90	0.95	2.90	0.92

表 3 预处理前后成像质量的 EOG 值

Table 3 EOG value of imaging quality before and after preprocessing

Condition	Single defect	Hole 1	Hole 2	Hole 3
Unprocessed	1.71×10^{-9}	1.55×10^{-10}	2.44×10^{-10}	3.34×10^{-10}
Preprocessed	3.47×10^{-9}	3.04×10^{-10}	4.17×10^{-10}	6.13×10^{-10}

表 4 预处理前后纵向深度和横向宽度的误差降幅与 EOG 值倍数

Table 4 Error reduction and EOG value multiple of longitudinal depth and lateral width before and after preprocessing

Parameter	Single defect	Hole 1	Hole 2	Hole 3	Average
Ld	1.2%	2.25%	3%	3%	2.37%
Lw	35.5%	0	41%	47%	30.88%
Multiple	2.03	1.96	1.70	1.84	1.88

6 结 论

基于激光超声的缺陷合成孔径后处理成像方法,提出一种超声模式波信号多融合预处理的 SAFT 成像优化方法,建立改进的超声收发的内部矩形缺陷模型,对激光超声的 SL 模式波信号进行预处理,并对单缺陷和多缺陷模型进行后处理成像。首先对探测到的超声模式波依次进行差分计算、模式波包络提取、包络极大值线性插值以及均值化去伪像的预处理,再基于 SAFT 对预处理之后的 SL 模式波进行合成孔径后处理聚焦成像。

结果表明:所提方法可清楚辨别亮黄成像区域;基于两种模型的成像结果的具体数据分析,相比预处理前的成像结果,预处理后缺陷成像的纵向深度的探测误差平均降低 2.37%,横向宽度的检测误差平均降低 30.88%,实现了缺陷的尺寸大小和位置测量精度的不同程度提升;根据 EOG 对优化处理前后的成像质量进行对比,成像反差明显增加,预处理后的 EOG 平均值是预处理前的 1.88 倍。所提优化方法对缺陷的实际可靠检测具有一定的应用前景。综上,SAFT 后处理成像优化方法在数值仿真上实现了对缺陷较灵敏的定性判别,在纵横方向上提高了对缺陷尺寸的检测精度,是一种可进一步实验验证的数据处理方法。

参 考 文 献

- [1] Sui H, Li K, Zhu Z Y, et al. Numerical simulation of internal defect imaging with the longitudinal wave generated by laser induced ultrasonic array[J]. Modern Physics Letters B, 2020, 35(6): 2150103.
- [2] Murray P R, Dewhurst R J. Application of a laser/EMAT system for using shear and LS mode converted waves[J]. Ultrasonics, 2002, 40: 771-776.
- [3] 杜蕊. 基于激光超声的金属内部孔状缺陷检测与成像技

术[D]. 太原: 中北大学, 2021.

Du R. Detection and imaging technology of hole defects in metal based on laser ultrasound[D]. Taiyuan: North University of China, 2021.

- [4] 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.
- [5] Du Y H. Study on synthetic aperture focused ultrasound imaging technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [5] Flaherty J J, Erikson K R, van Lund M. Synthetic aperture ultrasonic imaging systems: US3548642[P]. 1970-12-22.
- [6] Jensen J A, Nikolov S I, Gammelmark K L, et al. Synthetic aperture ultrasound imaging[J]. Ultrasonics, 2006, 44: e5-e15.
- [7] 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.
- [7] Sun B S, Shen J Z. Synthetic aperture focused ultrasound imaging (I)[J]. Journal of Applied Acoustics, 1993, 12(3): 43-48.
- [8] 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): 39-44.
- [8] Sun B S, Shen J Z. Synthetic aperture focused ultrasound imaging (II)[J]. Journal of Applied Acoustics, 1993, 12(5): 39-44.
- [9] 孙宝申, 沈建中. 合成孔径聚焦超声成像(三)[J]. 应用声学, 1994, 13(2): 39-44.
- [9] Sun B S, Shen J Z. Synthetic aperture focused ultrasound imaging (III)[J]. Journal of Applied Acoustics, 1994, 13(2): 39-44.
- [10] Yoon T, Kim Y, Awais M, et al. Acoustic velocity measurement for enhancing laser Ultrasound imaging based on time domain synthetic aperture focusing technique[J]. Sensors, 2023, 23(5): 2635.
- [11] Jiang Y, Han L, Wang Z X, et al. Finite element simulation of laser-synthetic aperture focusing technique (SAFT) detection of additive manufactured parts[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2023, 59(3): 332-345.
- [12] Ruiz-Veloz M, Gutiérrez-Juárez G, Polo-Parada L, et al. Image reconstruction algorithm for laser-induced ultrasonic imaging: the single sensor scanning synthetic aperture focusing technique[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2023, 153(1): 560-572.
- [13] 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.
- [14] Hu Z L, Huang J X, Xu P, et al. An optimized laser ultrasonic synthetic aperture imaging method using differential technique[J]. Modern Physics Letters B, 2021, 35(20): 2150345.
- [15] 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): 0304001.
- [15] Chen C, Ying K N, Liu N, et al. Application of phase shift migration method in laser ultrasonic SAFT[J].

- Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0304001.
- [16] 钟华, 孙凯华, 孙铭, 等. 激光超声的多模式合成孔径聚焦成像仿真分析[J]. 应用声学, 2022, 41(4): 535-547.
Zhong H, Sun K H, Sun M, et al. Simulation analysis of multi-mode synthetic aperture focusing technique based on laser ultrasound[J]. Journal of Applied Acoustics, 2022, 41(4): 535-547.
- [17] He W, Yuan J J, He J Z, et al. Study on the detection ability of laser ultrasonic SAFT technology for lead internal defects[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11717: 117173B.
- [18] 倪辰荫, 石一飞, 沈中华, 等. 激光激发材料中近场声表面波的数值模拟[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S1): 324-327.
Ni C Y, Shi Y F, Shen Z H, et al. Numerical simulation on near-field surface acoustic waves induced by laser line source[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S1): 324-327.
- [19] 张兴舜. 激光超声检测金属表面缺陷的信号处理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- Zhang X S. Study on signal processing of laser ultrasonic detection of metal surface defects[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [20] Magalas L B, Majewski M. Hilbert-twin-A novel Hilbert transform-based method to compute envelope of free decaying oscillations embedded in noise, and the logarithmic decrement in high-resolution mechanical spectroscopy HRMS[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2015, 60(2): 1091-1098.
- [21] 胡睿. 几种插值算法在气动数据计算中的比较[J]. 科技广场, 2012(4): 34-37.
Hu R. Comparison of several interpolation algorithms in the calculation of the aerodynamic data[J]. Science Mosaic, 2012(4): 34-37.
- [22] 李克斯. 基于激光超声的材料缺陷检测技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
Li K S. Research on material defect detection technology based on laser ultrasound[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.