

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514708

柔性超声阵列与自适应全聚焦成像在复杂构件无损检测中的应用*

孙贺¹, 高人杰¹, 营笑¹, 綦磊², 刘洋¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072; 2. 北京卫星环境工程研究所 北京 100094)

摘要:具有复杂曲面几何特征的关键构件广泛存在于各类工业结构中,其内部缺陷检测因声束畸变和耦合不稳定而面临显著挑战。为解决这一问题,提出一种面向复杂曲面构件检测的柔性超声阵列及其自适应成像方法。设计并制备了能够与不规则表面紧密共形的柔性超声传感器阵列。针对柔性阵列贴合曲面后产生的几何形变会引入阵元空间位置偏差,进而导致全聚焦成像中传播延时计算不准确的问题,提出了一种基于已知边界特征的自适应全聚焦成像方法。该方法无需外部定位设备,利用构件底面等几何边界作为参考,通过归一化互相关计算阵元之间的相对延时,实现阵列实际形态的重构,并对全聚焦成像中的延迟法则进行自适应校正,从而有效补偿阵列共形贴合所引入的相位失配。通过数值仿真与实验验证,对比分析了自适应校准前后全聚焦成像效果。在整体检测尺度为百毫米量级的曲面试块中,经自适应校准后,内部预制缺陷横向最小定位误差 2.16 mm,纵向最小定位误差 1.48 mm,缺陷位置能够被稳定清晰重建。同时,成像中的几何伪影得到有效抑制,整体成像信噪比显著提升。结果表明,提出的柔性超声阵列及其自适应成像方法能够在复杂曲面条件下实现可靠的高精度缺陷定位,为复杂曲面构件的超声无损检测提供了一种有效的技术途径。

关键词: 柔性超声传感器阵列; 自适应校准; 全聚焦; 复杂曲面结构; 无损检测

中图分类号: TH871.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Flexible ultrasonic array with adaptive total focusing imaging for nondestructive testing of complex components

Sun He¹, Gao Renjie¹, Ying Xiao¹, Qi Lei², Liu Yang¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Key components with complex curved geometries are widely found in various industrial structures, where internal defect detection faces significant challenges due to acoustic beam distortion and unstable coupling conditions. To address this issue, a flexible ultrasonic array and an adaptive imaging method for the inspection of complex curved components are proposed. A flexible ultrasonic array capable of conformal attachment to irregular surfaces is designed and fabricated. Considering that geometric deformation induced by conformal attachment of the flexible array introduces spatial position deviations of array elements, which consequently lead to inaccuracies in propagation delay calculations in total focusing method (TFM) imaging, an adaptive TFM imaging approach based on known boundary features is developed. The proposed method does not rely on external positioning devices. Instead, geometric boundaries such as the bottom surface of the inspected component are used as internal references. Relative time delays between array elements are estimated using normalized cross-correlation, enabling reconstruction of the actual array geometry and adaptive correction of the delay law in TFM imaging. As a result, phase mismatches caused by conformal attachment of the flexible array are effectively compensated. Numerical simulations and experimental validations are conducted to comparatively analyze TFM imaging performance before and after adaptive calibration. For curved specimens with an overall inspection scale on the order of hundreds of millimeters, the minimum localization errors of internal artificial defects after adaptive calibration are 2.16 mm in the lateral direction and 1.48 mm in the axial direction,

收稿日期: 2025-11-24 Received Date: 2025-11-24

* 基金项目: 国家自然科学基金(12474459)项目资助

respectively, allowing stable and clear reconstruction of defect positions. Meanwhile, geometric imaging artifacts are effectively suppressed, and the overall signal-to-noise ratio is significantly improved. The results demonstrate that the proposed flexible ultrasonic array combined with the adaptive imaging method enables reliable high-accuracy defect localization under complex curved surface conditions, providing an effective approach for ultrasonic nondestructive testing of complex curved components.

Keywords: flexible ultrasonic array; adaptive calibration; total focusing method; complex curved structures; nondestructive testing

0 引 言

工业领域中广泛存在具有复杂曲面轮廓的关键承载结构,其长期服役过程中可能发生的内部损伤对系统安全运行构成潜在威胁。超声检测作为在役装备状态评估的重要技术手段,在工程实践中发挥着关键作用。然而,面对复杂曲面引发的耦合不良、声束畸变及成像失真等挑战,因此,开展高精度的超声无损检测对于保障大型工业装置的运行可靠性与寿命管理具有重要意义^[1]。

柔性超声传感器的出现为克服这一局限提供新思路,其阵列能够与曲面表面完美贴合,实现高效超声耦合^[2]。随着材料、微加工与柔性电子技术的发展,多种柔性压电阵列结构陆续被提出,包括基于压电复合材料的柔性阵列^[3-5]、以及基于压电薄膜沉积技术构建的柔性超声换能器^[6]。柔性超声器件已在生物医学成像^[7-8]、曲面构件无损检测等场景中展示出良好适应性^[9]。柔性超声线阵列^[10]以及柔性超声面阵列^[11]可用于可穿戴监测、三维成像与复杂曲面检测等场景^[12-14]。不同的柔性压电超声传感器设计频率可低至几百千赫兹,高至数十兆赫兹^[15-16]。在无损检测领域,工作温度范围可由常温适用至百余摄氏度高温环境^[17]。在成像技术方面,全矩阵采集(full matrix capture, FMC)与全聚焦方法(total focusing method, TFM)因其高分辨率和高信噪比而成为超声阵列成像的重要配套技术^[18]。张昊等^[19]基于超声相控阵提出了一种结合断层扫描与 FMC-TFM 的三维成像方法,实现了在不依赖二维面阵探头的条件下对内部缺陷空间分布的高分辨率三维可视化。然而,TFM 在计算像素声程时依赖阵元空间坐标的准确性,柔性阵列在贴合曲面后会产生未知形变,使阵元位置偏离标定值,继而导致声程计算失配、相干叠加下降、伪影增强与定位偏差等问题。为应对这一挑战,研究者提出了多种柔性阵列几何误差补偿策略,包括基于光纤形状传感的阵列轮廓恢复^[20]、基于深度学习的柔性超声阵列形态估计与成像延时建模方法^[21]、基于阈值和矢量相干因子的 TFM 改进算法^[22-23]、以及基于成像质量反馈的阵列几何自校准方法^[24]。同时,关于柔性阵列覆盖三维曲面的成像方法、基于可拉伸材料的三维柔性声学阵列、以及在航空材料曲面检测中的 TFM 适配方法等工作,也为柔性阵列在复杂曲面检测中的应用奠定了基础^[25-27]。尽管上述方法取

得了积极进展,但多数方案依赖额外测量装置或存在计算量大、实时性不足等局限。因此,在无需外部测量设备的前提下,实现曲面贴合后的阵列形态精准重建,并进一步保证 TFM 成像质量,仍是当前柔性阵列复杂曲面检测中的关键技术瓶颈。

针对复杂曲面结构内部缺陷检测难题,研制了一种柔性超声传感器阵列并提出了相应的自适应全聚焦成像方法。在硬件方面,设计并制备了能够与不规则曲面紧密贴合的柔性超声传感器阵列,提升了曲面构件检测中的超声耦合效率和阵列布置灵活性。在成像方法方面,提出了一种基于已知边界特征的自适应 TFM 成像校准方法,利用被测工件本身已知的几何边界作为参考,不依赖任何外部定位装置,通过归一化互相关提取各阵元相对于参考阵元的相对延时,重构阵列实际形状并实时修正聚焦延迟法则。上述新方法能够有效消除阵列形变导致的相位失配,实现对缺陷的精准聚焦成像。实验结果表明,经自适应校准后,柔性阵列在凹、凸曲面试块中的成像伪影明显减弱,信噪比和分辨率显著提高,大幅提升了复杂曲面结构无损检测的可靠性和精度。

1 理论及方法

1.1 超声 TFM 成像理论

TFM 的基本原理是依据像素点到各发射—接收阵元之间的传播声程,对 FMC 数据进行延迟校正并相干叠加,以实现全孔径聚焦成像。该算法首先将待检测的成像区域离散为一系列精细的网格像素点 $P(x, z)$ 。对于待检测的成像区域中的任意一个像素点 $P(x, z)$,TFM 假定该点为一个虚拟的散射点,并计算超声波从发射阵元 i 传播到该点,再由该点反射回接收阵元 j 所需的理论飞行时间 $\tau_{ij}(x, z)$ 。在 TFM 成像过程中,首先需要获取 FMC 数据集。阵列中的第 i 个阵元作为发射器,而全部 N 个阵元(包括 i 自身)同时作为接收器,记录下 A 扫描信号 $h_{ij}(t)$,如图 1 所示。此过程依次激励所有 N 个阵元,最终获得一个包含 $N \times N$ 个 A 扫描信号的完整数据集。

随后,从 FMC 数据中提取与该延迟时间 τ_{ij} 相对应的信号幅值 $h_{ij}(\tau_{ij}(x, z))$ 。通过遍历所有 $N \times N$ 个发射—接收对,并将它们的幅值进行相干叠加,便可得到该像素点 $P(x, z)$ 的最终聚焦强度 $I(x, z)$ 。其数学模型如式(1)所示。

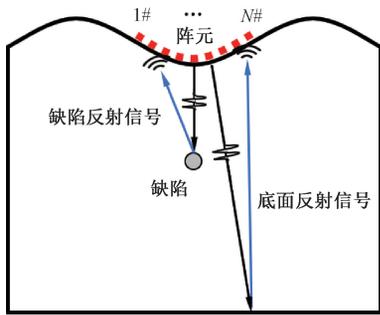


图1 原理示意图

Fig. 1 Diagram of the principle

$$I(x, z) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N h_{ij}(\tau_{ij}(x, z)) \right| \quad (1)$$

其中,飞行时间 $\tau_{ij}(x, z)$ 的计算是 TFM 成像的关键,依赖于声波在介质中的传播路径。在均匀、各向同性的材料中,声速为 v ,该时间延迟由式(2)确定,即:

$$\tau_{ij}(x, z) = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (z - z_i)^2} + \sqrt{(x - x_j)^2 + (z - z_j)^2}}{v} \quad (2)$$

由式(2)可知,标准 TFM 算法的成像质量严格依赖于一个关键假设,阵列中每个发射阵元 i 和接收阵元 j 的空间坐标 (x_i, z_i) 和 (x_j, z_j) 都是精确已知且固定不变的。对于传统的刚性阵列,该条件很容易满足。然而,对于复杂曲面结构内部缺陷检测,柔性压电阵列在贴合曲面表面时,会发生不可预测的弯曲和几何变形。这种变形导致每个阵元的实际空间坐标 (x_i, z_i) 变为未知量,且与平直的阵列坐标模型产生显著偏差。如果此时仍采用理想的阵元坐标代入式(2)进行 TFM 计算,将会引入严重的相位误差(即飞行时间 τ_{ij} 的失配)。这种失配破坏了式(1)中相干叠加的基础,导致声波无法有效聚焦,最终使成像结果出现严重的伪影、信噪比降低、缺陷定位失准等问题。因此,在对柔性阵列采集的数据进行 TFM 成像之前,必须对其因变形而引入的相位误差进行有效校准。

1.2 柔性超声阵列 TFM 成像校准方法

针对 1.1 节所分析的,柔性阵列因共形贴合导致阵元实际坐标未知,进而引起 TFM 成像严重相位失配的问题,本研究提出了一种基于已知边界条件的柔性超声传感器阵列相位自校准方法。在不依赖外部辅助设备的条件下,利用被测构件的几何特征作为校准基准。在仿真与实验中,选择了一个平整的工件底面作为该校准基准。本方法成立的理论基础是,底面反射信号提供了一个稳定的空间参考。尽管柔性阵列贴合后,每个阵元 i 的实际坐标 (x_i, z_i) 是未知的,但该特征的参考回波($h_{ii}(t)$ 信号)到达每个阵元的时间 $t_{i,ref}$ 是不

同的,这个时间差 τ_i 精确地反映了阵列的弯曲形态。从采集到的 $N \times N$ 组 FMC 数据 $h_{ij}(t)$ 中,提取出所有阵元接收到的底面反射信号。对于一维线阵列,选取阵列中间阵元作为参考阵元 r ,以保证参考回波的稳定性,该选择不影响方法的普适性。通过计算阵元 i 的回波执行归一化互相关,设 $h_i(t)$ 和 $h_r(t)$ 分别表示第 i 个阵元与参考阵元接收到的底面反射回波信号,则两者之间的归一化互相关函数定义为:

$$R_{i,r}(\Delta t) = \frac{\sum_t h_i(t) h_r(t + \Delta t)}{\sqrt{\sum_t h_i^2(t) \sum_t h_r^2(t)}} \quad (3)$$

$R_{i,r}(\Delta t)$ 峰值所在的时间偏移量即为阵元 i 相对于参考阵元 r 的相对延迟,即:

$$\tau_i = \underset{\Delta t}{\operatorname{argmax}} R_{i,r}(\Delta t) \quad (4)$$

根据式(4)估计出的相对时间延迟 τ_i 集合,结合材料中的声速 v 换算出各阵元的位置差,对于平直面,垂直位置差 Δz_i 可用式(5)计算得出,即:

$$\Delta z_i \approx \frac{\tau_i \times v}{2} \quad (5)$$

利用这组位置差,并结合阵列设计中已知的物理阵元间距作为几何约束,通过多项式曲线拟合算法完成阵列形状的推断与重建,从而获得所有阵元校准后的空间坐标 (x'_i, z'_i) 。最后,将这组已校准的阵元坐标 (x'_i, z'_i) 代替式(2)的理想坐标,重新计算并更新 TFM 的延迟矩阵,消除由阵列变形引入的相位误差,实现对缺陷的高精度聚焦成像。

2 仿真分析

2.1 有限元模型及仿真信号

构建二维声场有限元模型,并利用时域有限差分法求解超声体波在铝块中的传播过程。仿真模型 A 和 B 及其仿真信号如图 2 和 3 所示。

该仿真采用二维等效声学介质模型描述波场传播,基于交错网格的显式有限差分时间格式对时间与空间导数进行离散,并通过显式时间推进求解波场演化。为抑制边界反射,模型边界处引入吸收边界处理。如图 2(a) 和 3(a) 所示,仿真模型的几何尺寸设置为 $100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。在模型中心、深度 50 mm 处设置了一个直径为 3 mm 的圆形缺陷来模拟内部缺陷。在模型上表面设置了 32 个阵元激励载荷点模拟柔性超声传感器阵列,各阵元中心距在水平方向为 1.8 mm 。激励信号采用中心频率为 5 MHz 的脉冲信号,采样率 150 MHz 。仿真过程中采用全矩阵采集策略,即依次激励各个阵元,并由全部 32 个阵元接收回波信号,最终构成 32×32 的全矩阵数据集。

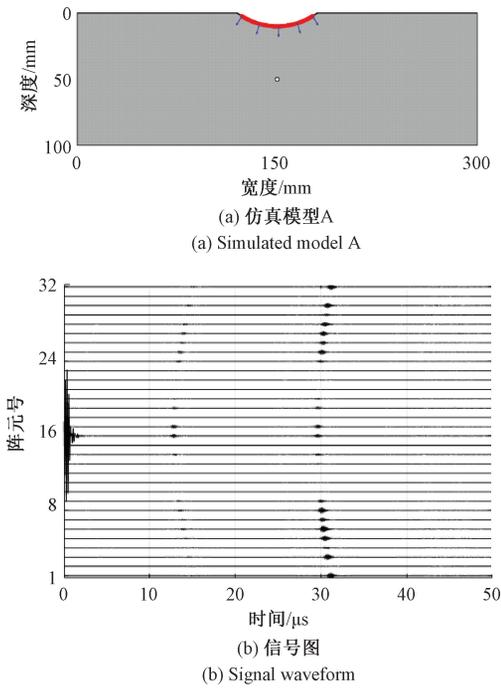


图 2 仿真模型 A 及仿真信号

Fig. 2 Simulation model A and simulated signals

将模型上表面设置为两种构型, 均采用直径为 160 mm 的圆弧面。如图 2(a) 所示模型 A 为凸阵列贴合于凹形表面, 圆心位于模型外部。如图 3(a) 所示模型 B 为凹阵列贴合于凸形表面, 圆心位于模型内部。图 2(b) 和 3(b) 展示了在单个阵元作为发射阵元条件下, 阵列中

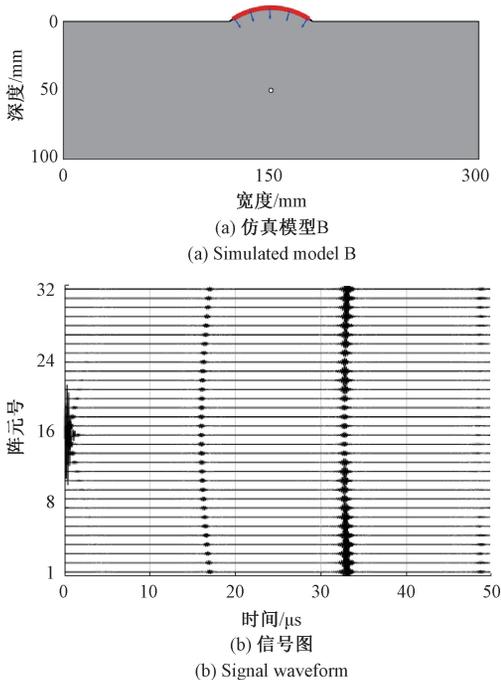


图 3 仿真模型 B 及仿真信号

Fig. 3 Simulation model B and simulated signals

全部阵元接收到的回波信号, 其中选取第 16 号阵元作为发射阵元进行说明。

2.2 全聚焦成像

基于 2.1 节仿真获得的 FMC 数据, 分别对两种曲面构型应用了所提出的自校准 TFM 算法, 并与未校准的 TFM 成像结果进行了对比, 成像结果经过 -40 dB 的对数压缩。图 4 展示了模型 A 的 TFM 成像结果, 在未校准时, 如图 4(a) 所示, 由于阵元位置失配, 位于深度 50 mm 处的缺陷无法被识别, 且在底面 (深度 100 mm 处) 也产生了严重的几何伪影。经自适应校准修正, 如图 4(b) 所示, TFM 成像质量得到显著提升, 圆形缺陷图像被检出, 伪影得到有效抑制, 底面回波也恢复了平直形态, 但由于凸阵列呈发散声束, 超声能量在传播过程中逐渐扩散, 导致成像区域深处的聚焦能量密度相对较低。

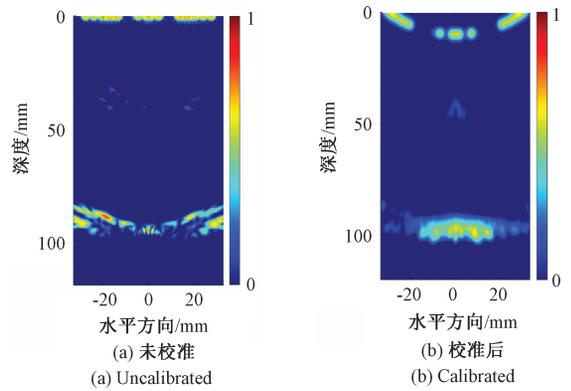


图 4 模型 A 全聚焦成像结果对比

Fig. 4 Comparison of TFM imaging results for model A

图 5 展示了模型 B 的成像结果。同样地, 未校准的 TFM 图像, 如图 5(a) 所示, 相位失配引起强烈伪影, 完全掩盖了深度 50 mm 处的缺陷信号, 经过自适应校准处理后, 图 5(b) 表明位于 (0, 50) 位置的缺陷被准确地聚焦成像。

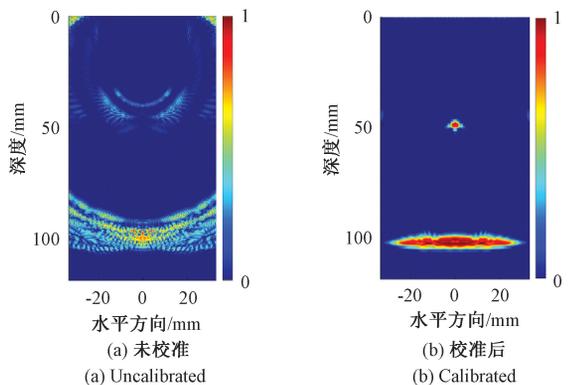


图 5 模型 B 全聚焦成像结果对比

Fig. 5 Comparison of TFM imaging results for model B

为定量评估所提方法性能,将仿真模型缺陷检测坐标及自适应校准前后缺陷定位误差统计结果汇总于表 1。

表 1 仿真模型缺陷检测坐标及误差统计

Table 1 Defect detection coordinates and error statistics for the simulation models (mm)

模型	参考坐标	缺陷坐标		绝对误差	
		校准前	校准后	横向	纵向
A	(0,50)	未定位	(2.16,42.66)	2.16	7.34
B	(0,50)	未定位	(1.02,51.36)	1.02	1.36

在校准前,由于阵列几何失配导致严重的相位偏差,两个模型均无法实现有效定位,而在应用自校准方法后,缺陷位置均被成功识别,横向与纵向误差显著降低,其中模型 A 的定位误差分别为 2.16 和 7.34 mm,模型 B 的误差分别为 1.02 和 1.36 mm,充分验证了所提出方法在仿真条件下的有效性。

3 实验验证与结果分析

为进一步验证所提自校准 TFM 算法在实际应用中的有效性,本章设计并制备了柔性超声阵列,并搭建了实验平台进行测试。

3.1 传感器设计

柔性超声传感器阵列的阵元尺寸与排列参数直接决定了最终的成像质量。阵元设计频率为 5 MHz,在铝材中的声波波长为 1.26 mm,在一个周期的信号激励条件下,纵向分辨率可近似表示为声波在材料中传播的波长的一半,纵向分辨率约为 0.63 mm。提出的自适应全聚焦成像方法依赖于各阵元的自发信号 $h_{ii}(t)$,必须确保单个阵元具有足够的激励能量和接收灵敏度,以在铝材中实现脉冲反射。首先对单个阵元在铝材中的传播特性进行仿真分析。图 6 展示了采用 Field II 超声场仿真工具仿真得到的 1 mm×10 mm 单阵元尺寸辐射声场,激励信号为中心频率 5 MHz 的单周期脉冲。通过计算阵元的空间脉冲响应并对时域结果进行包络处理,得到单阵元在铝材中的声场分布,结果表明该尺寸能够兼顾声束的扩散角与主轴能量,满足全聚焦成像对波束覆盖范围的要求。

针对复杂曲面构件内部缺陷的精准定位,阵列的横向分辨率是决定成像质量的关键指标。在全聚焦成像算法中,横向分辨率主要由阵列对目标点的聚焦孔径角决定,即阵列的总有效孔径越大,声束在焦点的汇聚光斑越小,分辨率越高。在 32 通道条件下,将阵元中心距设定

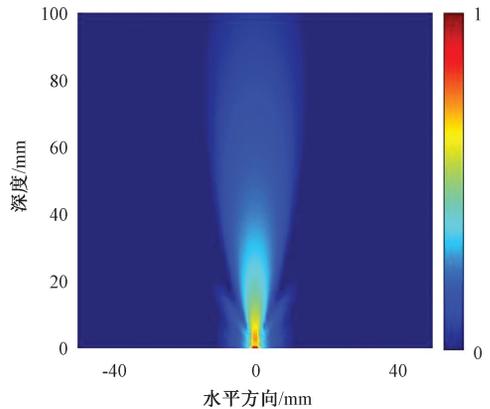


图 6 单阵元激励在铝中的声场分布

Fig. 6 Acoustic field in aluminum under single-element excitation

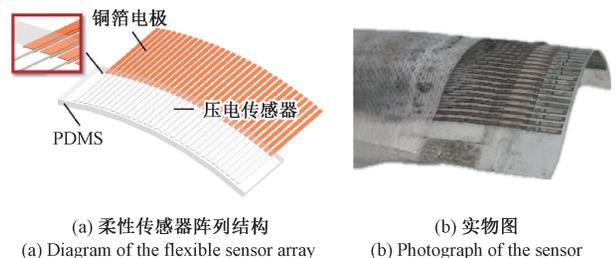
为 1.8 mm,阵列的总有效孔径 D 为 57.6 mm。根据瑞利判据,在检测深度 100 mm 处,该孔径对应的理论横向分辨率 Δx_L 可依照式(6)计算,即:

$$\Delta x_L = \frac{\lambda \cdot z}{D} \quad (6)$$

计算得到理论横向分辨率为 2.2 mm,能够满足对直径 3 mm 通孔缺陷的成像检测需求。尽管 1.8 mm 的阵元间距略大于铝中 5 MHz 纵波的波长,理论上可能引入一定的栅瓣干扰,但在通道数有限的约束下,较大的孔径能够显著提升成像区域的横向分辨率。

3.2 柔性超声传感器阵列制备与测试

基于 3.1 节的设计方案,将压电复合材料经划片机切割成 1 mm×10 mm 的独立阵元,利用激光切割机制备柔性电极,电极材料为铜箔。通过导电银胶将电极与压电阵元连接,封装后制成 32 阵元柔性超声传感器阵列,其结构示意图与实物图如图 7 所示。



(a) 柔性传感器阵列结构

(b) 实物图

(a) Diagram of the flexible sensor array

(b) Photograph of the sensor

图 7 柔性超声传感器阵列结构示意图与实物图

Fig. 7 Structural schematic and photograph of the flexible ultrasonic sensor array

传感器制备完成后,采用脉冲反射法测试了传感器全部阵元的中心频率、频率响应和带宽。图 8 展示了阵元脉冲回波信号及其对应的频率响应曲线。由图 8 可见,制备的传感器中心频率为 5.3 MHz。频响曲线中主

频带附近的局部起伏主要来源于有限尺寸阵元的频谱调制效应及脉冲回波测试条件下的多界面干涉, 不影响中心频率及有效带宽的判定。

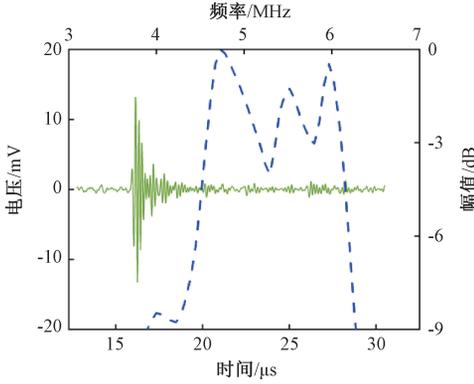
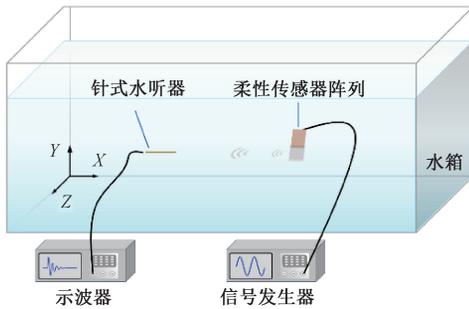


图 8 频率响应曲线

Fig. 8 Frequency response curve

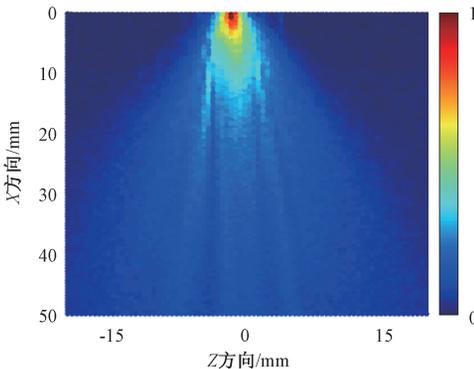
声场扫描数据中包含更丰富的传感器性能信息, 扫描平面内的声压分布情况值得关注, 利用水听器及声场扫描系统 (PA, NH2000 & UMS4) 对压电传感器全部阵元的辐射声场进行扫描测试, 测试范围平行于声轴平面, 测试结果用于评估阵列中各阵元性能的一致性。

水下声场扫描测试如图 9 所示。



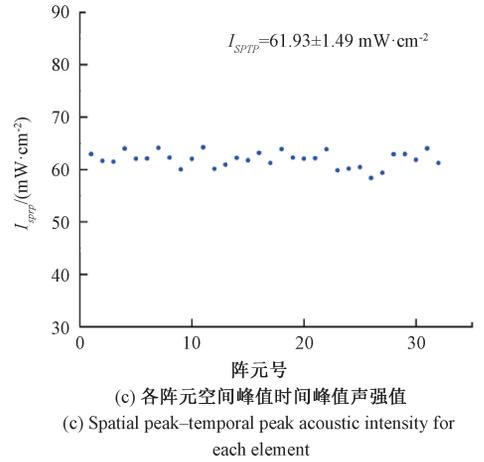
(a) 水下声场扫描示意图

(a) Diagram of underwater acoustic field scanning



(b) 声场分布

(b) Distribution of the acoustic field



(c) 各阵元空间峰值时间峰值声强
(c) Spatial peak-temporal peak acoustic intensity for each element

图 9 水下声场扫描测试

Fig. 9 Underwater acoustic field scanning measurement

声场扫描示意图及扫描方向定义如图 9 (a) 所示。在 XZ 平面内设置 Z 方向 40 mm、X 方向 50 mm 的扫描范围, 水听器扫描间隔为 0.5 mm。空间峰值时间峰值声强 I_{SPTP} 是以空间为变量的声强参数, 该参数为阵列整体一致性评估提供依据。定义水听器各扫描点接收到的连续的时域信号为 $p(t)$, 根据式 (7) 求得信号的脉冲声压平方积分为 p_i , 即:

$$p_i = \int_{-\infty}^{+\infty} [p(t)]^2 dt \quad (7)$$

时域信号中, 脉冲声压达到 $0.1p_i$ 的时间记为 t_1 , 脉冲声压达到 $0.9p_i$ 的时间记为 t_2 , 定义脉冲持续时间 t_d , 其公式如式 (8) 所示。

$$t_d = 1.25(t_2 - t_1) \quad (8)$$

脉冲声压级为 p_p , 即:

$$p_p = \left(\frac{p_i}{t_d} \right)^{0.5} \quad (9)$$

假设声波以近似平面波的方式传播, 求得时间峰值声强 I_{ip} , 即:

$$I_{ip} = \frac{p_p^2}{\rho c} \quad (10)$$

其中, ρ 是水的密度, c 是水中的声速。

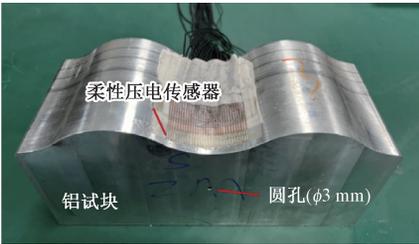
将时域计算结果应用拓展至空间, 对水听器扫描平面内的全部扫描结果的时域信号进行计算, 获得的 I_{ip} 空间分布最大值, 记为 I_{SPTP} , 即:

$$I_{SPTP} = \max [I_{ip}(x, y)] \quad (11)$$

计算全部阵元空间峰值时间峰值声强结果, 图 9 (c) 所示, $I_{SPTP} = 61.93 \pm 1.49 \text{ mW/cm}^2$ 。测试结果表明, 所制备的柔性阵列各阵元性能一致性好。

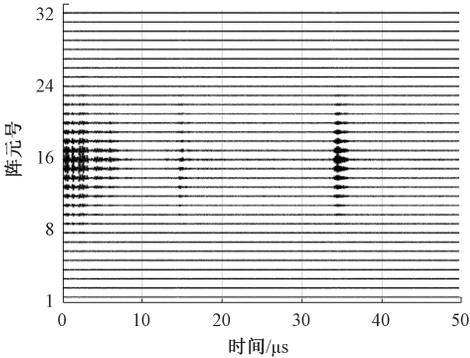
3.3 实验平台与数据采集

设计了柔性传感器阵列曲面结构内部缺陷检测实验以验证方法的实际效果。实验过程中,将柔性传感器阵列分别贴附于铝试块的凹形与凸形曲面上,以验证图2和3中的仿真工况。实验过程中,柔性超声传感器阵列通过超声耦合剂与铝试块表面实现声学耦合。阵列贴附于曲面表面后,施加适当的压紧力,减小因耦合层厚度不均匀引起的传播路径差与相位扰动。柔性阵列的共形贴合特性有助于在压紧条件下进一步改善界面接触状态,保证回波信号的稳定性。试块A和B的缺陷检测试验如图10和11所示。



(a) 试块A实验实物图

(a) Photograph of test block A used in the experiment



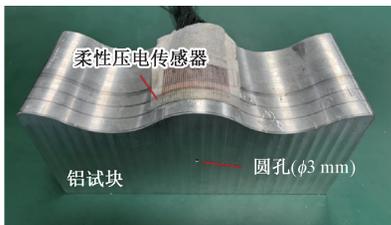
(b) 16号阵元激励阵列接收信号

(b) Array-received signals under excitation of element 16

图10 试块A缺陷检测实验

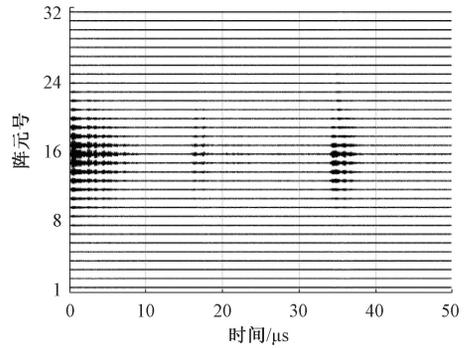
Fig. 10 Defect detection experiment for test block A

实验试块及柔性传感器布置如图10(a)和11(a)所示。实验所用的铝试块上表面具有曲面轮廓,底面为平面,内部预制了直径为3 mm的通孔缺陷。使用多通道超声实验系统,采集超声全矩阵信号。图10(b)和11(b)分别展示了在两个不同的试块条件下,第16号阵元激励,全



(a) 试块B实验实物图

(a) Photograph of test block B used in the experiment



(b) 16号阵元激励阵列接收信号

(b) Array-received signals under excitation of element 16

图11 试块B缺陷检测实验

Fig. 11 Defect detection experiment for test block B

部通道接收到的实验信号。数据采集完成后,依据采集到的FMC信号执行1.2节所述的自适应校准方法,得到修正后的阵元空间坐标。接着,将自适应校准后的阵元位置代入波达时间计算模型,重新确定每个阵元到成像区域各像素点的传播延时,更新TFM延迟矩阵。最后,使用经过几何补偿的延迟参数,对FMC数据进行TFM重建,实现几何误差补偿后的高分辨率成像。

3.4 自适应校准前后缺陷检测结果对比

为验证自校准算法的实际有效性,对3.3节采集的FMC实验数据分别进行了未校准和自适应校准TFM成像处理,结果如图12和13所示。

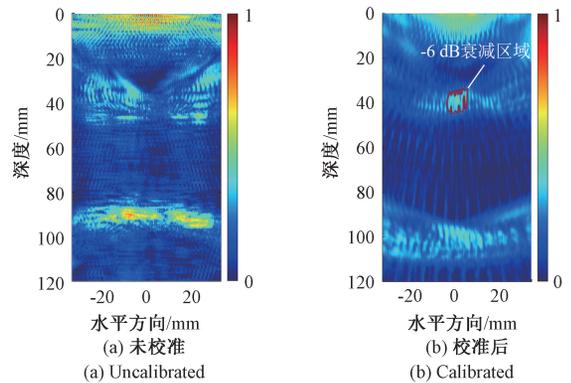


图12 试块A全聚焦成像结果对比

Fig. 12 Comparison of TFM imaging for test block A

图12展示了试块A的实验信号成像结果。在未施加校准时,如图12(a)所示,图像几何伪影严重,声能发散,位于深度50 mm处的缺陷信号被完全掩盖,无法识别。自适应校准后,如图12(b)所示,伪影得到抑制,除底面边界成像外,幅值最大点位于(3.05, 37.33),以该点为参考,曲线标记了幅值高于50%的区域。

图13展示了凹阵列的成像结果。同样地,未校准的图像如图13(a)所示,由相位失配引起的弧形伪影使缺

陷难以辨认。而经过校准处理后如图 13(b) 所示,伪影被消除,缺陷被准确地重建成像,幅值最大点位于(2.16, 48.52),以该点为参考,曲线标记了幅值高于 50% 的区域。凹阵列具有聚焦的信号传播特点,检测区域内信号幅值高于凸阵列信号幅值。

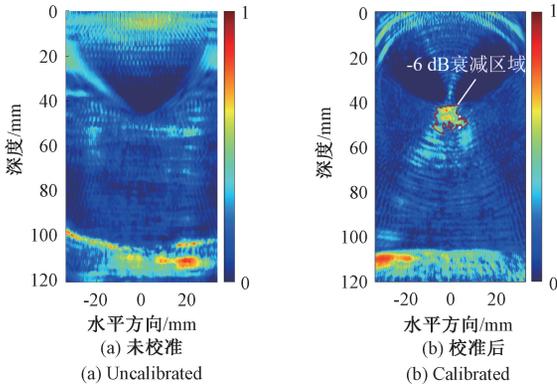


图 13 试块 B 全聚焦成像结果对比

Fig. 13 Comparison of TFM imaging for test block B

为定量评估所提方法的性能,表 2 统计了校准前后试块缺陷检测坐标及误差统计结果。

表 2 试块缺陷检测坐标及误差统计

Table 2 Defect detection coordinates and error statistics for the test blocks (mm)

试块	参考坐标	缺陷坐标		绝对误差	
		校准前	校准后	横向	纵向
A	(0,40)	未定位	(3.05,37.33)	3.05	2.67
B	(0,50)	未定位	(2.16,48.52)	2.16	1.48

如成像结果所示,校准前由于严重的相位失配,缺陷定位误差极大,甚至无法定位。校准后,缺陷的横向定位误差分别为 3.05 和 2.16 mm。纵向定位误差分别为 2.67 和 1.48 mm。实验结果与仿真信号处理高度一致,结果表明,所研制的柔性超声传感器阵列能够在复杂曲面结构上实现有效的缺陷成像,所提出的自适应校准方法可显著补偿阵列共形贴合所导致的相位误差,显著提升成像质量与缺陷定位精度。

4 结 论

针对复杂曲面构件内部缺陷的检测难题,围绕柔性超声阵列的研制与自适应成像方法开展了系统研究。本研究提出并验证了一种基于已知边界条件的自适应校准方法。

首先,研制了能够与曲面结构紧密共形的柔性超声

传感器阵列,使其在不规则表面上依然能够实现稳定耦合与回波获取,为复杂曲面构件的超声检测奠定了硬件基础。在此基础上,本研究提出了一种基于已知边界特征的相位自校准方法,通过利用构件自身的反射边界作为标定基准,结合归一化互相关实现对阵列贴合形变所造成的相位偏差进行精确补偿,无需依赖外部定位设备即可重建阵元真实空间分布。仿真与实验结果表明,柔性阵列在曲面结构中能够可靠获取缺陷信息,而所提出的自适应校准方法能够有效消除阵列形变引起的相位失配,显著抑制成像伪影并提升全聚焦成像效果。两者结合使复杂曲面构件的超声缺陷检测在图像质量、缺陷可检性与定位一致性方面得到明显改善。

综上,柔性超声阵列与自适应成像校准相结合的技术路线为复杂曲面构件的高精度无损检测提供了一种可行且有效的解决思路,具有良好的工程应用前景。在实际工程应用中,反射边界可能存在形貌起伏、曲率变化或加工误差。针对非理想反射边界条件,未来将通过引入局部等效参考边界及多参考信息融合等策略,进一步提升相对延迟估计的鲁棒性,并拓展该方法在在线检测与工程应用场景中的适用性,为其在重大装备状态监测与安全保障中的应用提供支撑。

参考文献

- [1] 曹欢庆,朱启民,赵培含,等. 复杂型面结构超声成像检测研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 42-53.
CAO H Q, ZHU Q M, ZHAO P H, et al. Survey on ultrasonic imaging of complex-shaped structures [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 42-53.
- [2] CASULA O, TOULLELAN G, ROY O, et al. Ultrasonic nondestructive testing of complex components with flexible phased-array transducers[C]. 10th European Conference on Non-Destructive Testing, 2010: 558-566.
- [3] KIM T, CUI ZH, CHANG W Y, et al. Flexible 1~3 composite ultrasound transducers with silver-nanowire-based stretchable electrodes [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(8): 6955-6962.
- [4] 刘畅,孙贺,任佳豪,等. 用于动脉血压监测的柔性超声换能器阵列[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12): 225-234.
LIU CH, SUN H, REN J H, et al. Flexible ultrasonic transducer array for arterial blood pressure monitoring[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 225-234.
- [5] 沈意平,吴迪,张博南,等. 钢轨裂纹导波检测的柔

- 性电复合材料传感技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 62-70.
- SHEN Y P, WU D, ZHANG B N, et al. Research on flexible piezoelectric composite sensing technology for guided wave detection of rail cracks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 62-70.
- [6] 曹从军, 赖凯旋, 王旭升, 等. 基于柔性压电薄膜的可穿戴脉搏传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(10): 35-47.
- CAO C J, LAI K X, WANG X SH, et al. Design of wearable pulse sensor based on flexible piezoelectric thin film[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10): 35-47.
- [7] SUN H, LYU CH Y, WANG L F, et al. Flexible ultrasonic transducer array with automatic phase calibration for arteriosclerosis detection[J]. Ultrasonics, 2025: 107850.
- [8] WANG CH H, CHEN X Y, WANG L, et al. Bioadhesive ultrasound for long-term continuous imaging of diverse organs[J]. Science, 2022, 377(6605): 517-523.
- [9] HU H J, ZHU X, WANG CH H, et al. Stretchable ultrasonic transducer arrays for three-dimensional imaging on complex surfaces [J]. Science Advances, 2018, 4(3): eaar3979.
- [10] CHENG SH Y, ZOU J Y, YAN SH Y, et al. Vascular ultrasound imaging with flexible wearable array [J]. Measurement Science and Technology, 2025, 36(5): 055404.
- [11] ZHOU S, GAO X X, PARK G, et al. Transcranial volumetric imaging using a conformal ultrasound patch[J]. Nature, 2024, 629(8013): 810-818.
- [12] XUE X M, WU H Y, CAI Q Q, et al. Flexible ultrasonic transducers for wearable biomedical applications: A review on advanced materials, structural designs, and future prospects[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2023, 71(7): 786-810.
- [13] REN D Y, YIN Y G, LI CH Y, et al. Recent advances in flexible ultrasonic transducers: From materials optimization to imaging applications[J]. Micromachines, 2023, 14(1): 126.
- [14] VAN NEER P L, PETERS L C J M, VERBEEK R G F A, et al. Flexible large-area ultrasound arrays for medical applications made using embossed polymer structures[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 2802.
- [15] ZENG Y SH, SUN X, ZHANG J H, et al. High-frequency wearable ultrasound array belt for small animal echocardiography[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2024, 71(12): 1915-1923.
- [16] SUN H, WANG L F, REN J H, et al. Flexible ultrasonic sensor array for guided wave nondestructive testing of thin-walled structures[J]. Advanced Devices & Instrumentation, 2025, 6: 0084.
- [17] SHIH J L, WU K T, JEN C K, et al. Applications of flexible ultrasonic transducer array for defect detection at 150°C [J]. Sensors, 2013, 13(1): 975-983.
- [18] 张楠, 许才彬, 邓明晰. 检测声学成像原理与技术综述[J]. 应用声学, 2025, 44(1): 13-35.
- ZHANG N, XU C B, DENG M X. Review of principles and techniques of acoustic inspection imaging methods[J]. Journal of Applied Acoustics, 2025, 44(1): 13-35.
- [19] 张昊, 陈世利, 贾乐成. 基于超声相控线阵的缺陷全聚焦三维成像[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7): 992-999.
- ZHANG H, CHEN SH L, JIA L CH. Three-dimensional total-focus imaging based on ultrasonic linear phased array[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(7): 992-999.
- [20] CHEN W C, LIU J M, LEI SH, et al. Flexible ultrasound transducer with embedded optical shape sensing fiber for biomedical imaging applications [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2023, 70(10): 2841-2851.
- [21] GAO X, HUANG L H, HUANG P, et al. Ultrasound imaging with flexible transducers based on real-time and high-accuracy shape estimation[J]. Ultrasonics, 2025, 148: 107551.
- [22] ZHAO T W, LIU Z Y, ZHANG D H, et al. Research on the vector coherent factor threshold total focusing imaging method for austenitic stainless steel based on material characteristics[J]. Metals, 2025, 15(8): 901.
- [23] GUAN SH Y, WANG X K, LIN H, et al. TFM imaging of aeroengine casing ring forgings with curved surfaces using acoustic field threshold segmentation and vector coherence factor [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(11): 401-415.
- [24] FREY B N, HYUN D, SIMSON W, et al. Ultraflex: Iterative model-based ultrasonic flexible-array shape

calibration[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2025, 72(11): 1462-1475.

- [25] ELLOIAN J, JADWISZCZAK J, ARSLAN V, et al. Flexible ultrasound transceiver array for non-invasive surface-conformable imaging enabled by geometric phase correction [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 16184.
- [26] ZHANG Y CH, LI X, LIU L SH, et al. Adaptive focusing imaging method for flexible ultrasonic arrays on complex curved structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 241: 113584.
- [27] SUN X Y, CROXFORD A J, DRINKWATER B W. Continuous monitoring with a permanently installed high-resolution ultrasonic phased array[J]. Structural Health Monitoring, 2023, 22(5): 3451-3464.

作者简介



孙贺, 2016年和2019年于东北石油大学获得学士学位和硕士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为复杂结构无损检测、柔性超声传感器及高分辨率超声成像技术。

E-mail: sunhe_ultrasonics@tju.edu.cn

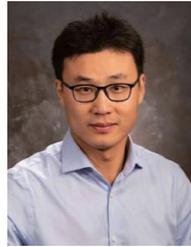
Sun He received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Northeast Petroleum University in 2016 and 2019, respectively. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Tianjin University. His main research interests include nondestructive testing of complex structures, flexible ultrasonic transducers, and high-resolution ultrasonic imaging techniques.



綦磊, 2009年于天津大学获得学士学位, 2012年于天津大学获得硕士学位, 2021年于天津大学获得博士学位, 现为北京卫星环境工程研究所研究员, 主要研究方向为声学无损检测及结构健康监测技术。

E-mail: qilei511@126.com

Qi Lei received his B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees all from Tianjin University in 2009, 2012 and 2021, respectively. He is currently a researcher at the Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering. His main research interests include acoustic nondestructive testing and structural health monitoring technologies.



刘洋(通信作者), 2007年于重庆大学获得学士学位, 2010年于浙江大学获得硕士学位, 2014年于宾夕法尼亚州立大学获得博士学位, 现为天津大学教授、博士生导师, 主要研究方向为声场理论、超声传感器及智能高分辨率超声成像技术。

E-mail: ultrasonicslab@tju.edu.cn

Liu Yang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2007, his M. Sc. degree from Zhejiang University in 2010, and his Ph. D. degree from the Pennsylvania State University in 2014. He is currently a professor and Ph. D. supervisor at Tianjin University. His main research interests include acoustic field theory, ultrasonic transducers, and intelligent high-resolution ultrasonic imaging technologies.