

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413137

# 基于改进稀疏表示的高衰减厚壁结构 超声相控阵全聚焦成像\*

周至伟<sup>1</sup>, 饶静<sup>1</sup>, 牛伟<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191; 2. 中国航空工业集团公司西安  
航空计算技术研究所 西安 710068)

**摘要:**针对常规超声相控阵在检测高衰减厚壁结构中存在的缺陷特征提取较难和信噪比较低的问题,采用了一种基于改进稀疏表示的超声信号处理方法来解决以上问题。首先对超声全矩阵捕捉数据进行预处理获得分段信号及其对应的时频参数。基于分段信号的时频参数,构造出自适应 Gabor 子字典,再利用改进的支持匹配追踪算法对分段信号进行稀疏分解与重构。与常规正交匹配追踪算法相比,该改进支持匹配追踪算法结合了自适应 Gabor 子字典和  $l_p$  范数( $0 < p < 1$ )。自适应 Gabor 子字典通过优化字典原子以更好地匹配信号特性,而  $l_p$  范数则提供了一种更灵活的稀疏度测量方式,这使得该算法能够在紧凑的字典上更精确地重构超声信号,提高了重构信号的质量。最后,对处理后的全矩阵捕捉数据采用常规全聚焦成像算法实现超声成像。实验结果表明,改进稀疏表示能够准确提取缺陷信号和提高信噪比,提高了高衰减厚壁结构内部缺陷超声图像质量。

**关键词:**高衰减厚壁结构;超声检测;信号处理;稀疏表示;全聚焦成像

**中图分类号:** TH878 TB553 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Total focusing method for highly attenuated thick-walled structures based on improved sparse representation

Zhou Zhiwei<sup>1</sup>, Rao Jing<sup>1</sup>, Niu Wei<sup>2</sup>

(1. School of Instrumentation and Opto-Electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** To address the challenges of extracting defect features and low signal-to-noise ratio (SNR) of conventional ultrasonic phased array in the detection of highly attenuated thick-walled structures, an ultrasonic signal processing method based on the improved sparse representation is proposed to solve the problems in this article. Firstly, the ultrasonic full matrix capture is preprocessed to obtain segmented signals and their corresponding time-frequency parameters. Building upon the parameters, the adaptive Gabor sub-dictionaries are constructed. Then, the segmented signals are sparsely decomposed and reconstructed by the improved support matching pursuit algorithm. Compared with the conventional orthogonal matching pursuit algorithm, the improved support matching pursuit algorithm combines the adaptive Gabor sub-dictionaries and  $l_p$ -norm ( $0 < p < 1$ ). Atoms of the sub-dictionaries are optimized to better match the characteristics of ultrasonic signals, while a more flexible approach to measuring sparsity is provided by  $l_p$ -norm. They reconstruct ultrasonic signals more accurately through compact dictionaries, enhancing the quality of reconstructed signals. Finally, the total focusing method is applied to the processed full matrix capture to produce ultrasonic images. Experimental results show that the improved sparse representation can accurately extract defect signals and achieve high SNR, improving the ultrasonic image quality of internal defects contained in highly attenuated thick-walled structures.

**Keywords:** highly attenuated thick-walled structures; ultrasonic testing; signal processing; sparse representation; total focusing method

## 0 引 言

高密度聚乙烯 (high density polyethylene, HDPE) 具有耐腐蚀性、重量轻和安装方便等优点,在核电、石油和天然气等行业中应用广泛<sup>[1-3]</sup>。同时,具有优异耐久性和承载能力的混凝土也是民用基础设施中一种常见的材料<sup>[4-6]</sup>。在 HDPE 和混凝土等厚壁结构的使用过程中,不可避免会出现孔洞、裂纹等缺陷,这些缺陷可能会造成严重的安全隐患。超声相控阵检测技术具有穿透能力强和安全性能高等优点,为 HDPE 和混凝土等厚壁结构内部缺陷检测提供了一种有效的方式<sup>[7]</sup>。但是,超声相控阵技术在检测 HDPE 和混凝土等高衰减厚壁结构内部缺陷时仍面临着缺陷特征提取较难和信噪比低的问题<sup>[8-11]</sup>。

针对以上问题,国内外研究人员已经采用了经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 和变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD) 等方法对高衰减厚壁结构内的超声信号进行处理。Zatar 等<sup>[12]</sup> 针对混凝土中的超声信号提出了一种基于 EMD 和希尔伯特变换的处理方法。该方法使用 EMD 将含噪信号分解成一组本征模函数 (intrinsic mode function, IMF), 然后计算每个 IMF 的赫斯特指数确定需要滤波的分量,最后重建滤波后的分量以实现噪声消除。希尔伯特变换将降噪后的信号转换成具有复包络的解析信号,这有助于评估信号包络并确定缺陷回波信号的飞行时间。该方法可以准确定位混凝土试件中的孔洞缺陷,但尚未应用在裂缝和腐蚀等缺陷检测。Wu 等<sup>[13]</sup> 在混凝土内部缺陷检测中应用 VMD 处理超声信号,有效降低了噪声干扰并提升了信号质量。VMD 通过迭代搜索变分模型的最优解,自适应地将信号分解为具有不同频率和带宽的 IMF, 然后根据 IMF 和原始信号的相关系数,选择相关性高的 IMF 进行信号重构。与常规 EMD 相比,VMD 有效地抑制了模态混叠,但其分解效果依赖于 IMF 的数量和惩罚系数。在此基础上,Wang 等<sup>[14]</sup> 进一步结合遗传算法 (genetic algorithm, GA)、VMD、萨维茨基-戈莱滤 (Savitzky-Golay, SG) 滤波和移动平均滤波,提出了一种 GA-VMD-SG 降噪算法。该算法首先通过 GA 获取 VMD 中的 IMF 个数和惩罚系数,然后对含噪信号进行 VMD 处理;通过计算 IMF 与原始信号的相关系数,将信号分为相关分量和噪声分量;最后对相关分量和噪声分量分别做 SG 滤波和移动平均滤波处理,重构降噪信号。实验结果表明,采用 GA-VMD-SG 算法处理后的超声信号信噪比为 16.88 dB、均方误差为 0.19,在超声相控阵隧道灌浆检测中展示出良好的降噪效果。通过 GA 优化 VMD 参数,该降噪算法可以获得良好的效果,但相较于常规 VMD,其处理效率较低。

Rao 等<sup>[15]</sup> 提出了一种基于帕克斯-麦克莱伦 (Parks-

McClellan, PM) 算法的线性相位有限脉冲响应 (finite impulse response, FIR) 滤波器,可有效降低超声全矩阵捕捉 (full matrix capture, FMC) 数据中的噪声,提高信噪比。在此基础上利用超声全聚焦成像 (total focusing method, TFM) 算法,实现了 HDPE 试样中缺陷的准确检测。基于 PM 算法的 FIR 滤波器具有线性相位和稳定性的特点,然而与无限脉冲响应滤波器相比,为了达到相同的滤波性能,FIR 滤波器通常需要更高的阶数,从而导致更大的计算量<sup>[16]</sup>。除此之外,奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 是一种超声无损检测中常用的信号处理方法,可有效提高信噪比。彭永恒等<sup>[17]</sup> 提出了一种结合傅里叶变换、SVD 和深度学习的方法进行振动信号分析。该方法首先采用了短时傅里叶变换将信号从时域转换到频域,然后对频域信号进行 SVD,以提取信号特征并构造特征矢量。这些特征矢量随后被输入到反向传播神经网络中进行缺陷识别,达到了 94.6% 的缺陷识别率。但该方法仅聚焦于频域分析。Rao 等<sup>[18]</sup> 进一步提出了一种基于时空奇异值分解 (spatio-temporal singular value decomposition, STSVD) 的信号处理方法,首先将 FMC 数据解调为包含同相和正交 (I/Q) 分量的复解析信号,再使用 STSVD 处理算法对 I/Q 信号进行滤波,最后将滤波后的 I/Q 信号转换回实数信号。实验结果表明,所提出的方法可有效提高信噪比,实现高衰减材料,尤其是 HDPE 中深层缺陷的准确检测。然而在 SVD 中,选择合适的奇异值阈值十分重要<sup>[19]</sup>。

随着稀疏表示理论的发展,其在信号处理中的应用越来越广泛<sup>[20-24]</sup>。通过在冗余的基函数库中寻找信号最稀疏的表达方式,稀疏表示能有效提取信号特征、抑制噪声干扰,从而实现良好的时间和频率分辨率以及抗噪声性能。常见的稀疏表示算法主要包括匹配追踪 (matching pursuit, MP)<sup>[25]</sup>、正交匹配追踪 (orthogonal matching pursuit, OMP)<sup>[26]</sup> 等贪婪算法,以及基追踪 (basis pursuit, BP)<sup>[27]</sup>、迭代收缩阈值 (iterative shrinkage thresholding algorithm, ISTA)<sup>[28]</sup> 等凸松弛算法。在此基础上,研究人员也提出了衍生算法,如压缩采样匹配追踪 (compressive sampling matching pursuit, CoSaMP)<sup>[29]</sup>、分阶段正交匹配追踪 (stagewise orthogonal matching pursuit, StOMP)<sup>[30]</sup> 和快速迭代收缩阈值算法 (fast iterative shrinkage thresholding algorithm, FISTA)<sup>[31]</sup>。近年来,稀疏表示在超声信号处理中取得了显著的进展。郑凯等<sup>[32]</sup> 提出了一种基于 K-奇异值分解 (K-singular value decomposition, K-SVD) 字典学习算法的稀疏表示方法,通过训练过完备字典、使用 OMP 算法对信号进行稀疏重构,从而解决了 HDPE 缺陷检测中信噪比低的问题。然而,当信号采样点数较多时,字典矩阵的规模会变得庞大<sup>[33]</sup>。针对该问题,宿磊等<sup>[34]</sup> 提出了一种基于 K-SVD 训练局部字典

的信号降噪方法。该方法通过对超声信号进行分段处理,减小了矩阵的尺寸和计算复杂度,从而实现了检测芯片中超声信号的降噪。尽管基于 K-SVD 算法训练的字典具有灵活性,但其效果受到训练样本大小和质量的影响。Gabor 字典由无需训练的 Gabor 原子构成,Gabor 原子通过离散化 Gabor 函数的尺度、时移、频率和相位参数确定,能有效表征超声信号的时频特征,因此在超声信号处理中得到良好的应用<sup>[35-36]</sup>。例如,Wu 等<sup>[37]</sup>提出了一种基于  $l_p(0 < p < 1)$  范数惩罚的非凸稀疏正则化信号处理方法,利用 Gabor 字典对噪声信号进行稀疏表示,并设计剪枝算子来抑制噪声,实现了不锈钢缺陷反射回波的识别与重建。为了在不增加字典尺寸的情况下实现信号高分辨率分解,Wang 等<sup>[38]</sup>提出了一种基于支持匹配追踪 (support matching pursuit, SMP) 算法的稀疏表示方法。该算法通过在时域上迭代分割超声信号,并迭代压缩 Gabor 字典的时频参数,降低了字典尺寸并提高了 Gabor 原子的分辨率,从而解决了超声检测中的回波重叠问题。尽管该算法实现了信号的分离和重构,但迭代过程降低了稀疏表示的效率。

本研究提出一种结合自适应 Gabor 子字典<sup>[39]</sup>和改进的 SMP 算法的稀疏表示超声信号处理方法,旨在解决高衰减厚壁结构超声相控阵检测中缺陷特征提取困难和信噪比低的问题。首先对超声 A 扫描信号进行分段处理,以降低信号长度;提取分段信号的时频参数并构造自适应 Gabor 子字典。其次基于改进的支持匹配追踪算法将分段信号稀疏分解为一系列相关的 Gabor 原子并重构,用于提取缺陷特征并抑制噪声干扰。最后通过在 HDPE 和混凝土试样上应用此方法并进行 TFM 成像,检测高衰减厚壁结构内部缺陷。

## 1 基于改进稀疏表示的超声相控阵 TFM 成像

本文采用的基于改进稀疏表示的超声相控阵 TFM 成像法分为 3 个主要部分:1)对超声信号进行分段处理,并设计相应的自适应 Gabor 子字典;2)采用基于  $l_p(0 < p < 1)$  范数的改进支持匹配追踪算法对分段信号进行稀疏分解与重构;3)在上述信号处理的基础上,采用常规超声相控阵 TFM 成像算法对高衰减厚壁结构内部缺陷进行成像。

### 1.1 构造自适应 Gabor 子字典

超声相控阵采集的全矩阵捕捉 FMC 数据包包含所有发射-接收阵元组合的超声 A 扫描信号,即  $N_s \times N_r \times N_t$ ,其中  $N_s$  表示 A 扫描信号的采样个数, $N_r$  和  $N_t$  分别表示发射探头和接收探头的个数。根据常规完备 Gabor 字典的构造方式<sup>[25]</sup>,字典原子个数为  $O(N_s \log_2(N_s))$ ,当 A 扫描信号的采样个数  $N_s$  为 4 096 时,字典的大小为

4 096×196 608。这不仅给计算机内存造成严重负担,也降低了稀疏表示的计算效率。为了解决这一问题,本文构造了自适应 Gabor 子字典,用于减小字典矩阵的尺寸并提高字典的适应性。

自适应 Gabor 子字典的构造包含 3 个主要步骤。

1)通过对接收到的 A 扫描信号使用快速傅里叶变换,计算其中心频率以确定字典的频率参数范围。

2)对 A 扫描信号进行分段处理(如图 1 所示),相邻信号重叠 50%。

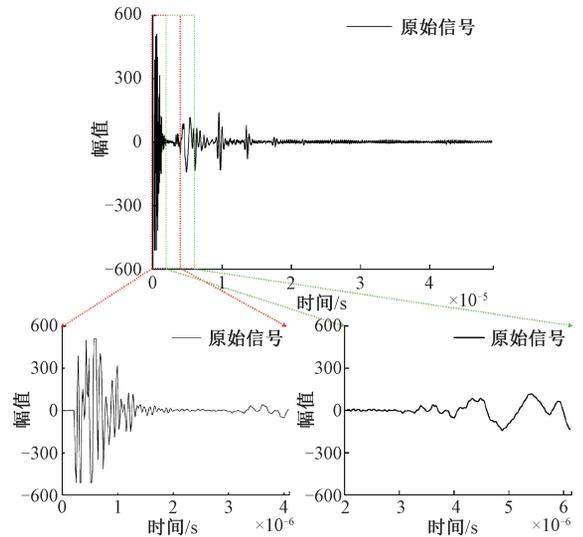


图 1 A 扫描信号分段

Fig. 1 A-scan signal segmentation

每个分段 A 扫描信号的峭度  $kur$  计算方法如式(1)所示。

$$kur = \frac{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y(i) - \mu)^4}{\left( \frac{1}{M} \left( \sum_{i=1}^M (y(i) - \mu)^2 \right) \right)^2} \quad (1)$$

式中: $y$  表示每个分段 A 扫描信号; $\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y(i)$  表示分段信号的均值; $M$  表示分段 A 扫描信号的采样个数。峭度  $kur$  是一个描述峰部尖锐度的指标,在本研究中用于确定超声信号的尺度参数范围。

3)基于信号的频率和尺度参数范围,利用 Gabor 函数构造自适应 Gabor 子字典,其中 Gabor 函数的表达式为:

$$g(t) = \frac{A}{\sqrt{s}} e^{-\frac{\pi(t-u)^2}{s^2}} \cos(vt + \varphi) \quad (2)$$

式中: $s$  代表尺度因子,确定了函数能量分布情况; $u$  代表平移因子,确定了函数波形出现的时间位置; $v$  代表信号的角频率; $\varphi$  代表相位因子; $A$  代表能量归一化参数。将 Gabor 函数的时频参数 ( $s, u, v, \varphi$ ) 离散化,得到了具有不

同时频特征的字典原子。构造的字典充分利用了超声信号的时频域特征,具有自适应和紧凑性的特点。当分段 A 扫描信号的采样个数  $M$  为 256 时,字典的大小为  $256 \times 2\ 048$ ,提高了稀疏表示的效率。

### 1.2 超声信号稀疏分解与重构

假设构造的自适应 Gabor 子字典为  $D = [d_1, d_2, \dots, d_n] \in R^{m \times n} (m < n)$ , 分段 A 扫描信号为  $y \in R^m$ , 则分段 A 扫描信号的稀疏表示为:

$$y = Dx + \varepsilon \quad (3)$$

式中:  $x \in R^n$  表示稀疏向量;  $x$  中的元素  $x_i$  为对应字典原子  $d_i$  的表示系数;  $\varepsilon$  表示误差项。  $x$  的稀疏度由  $l_0$  范数来度量,它表示向量中非零元素的个数,定义为:

$$\|x\|_0 = \sum_{i=1}^n IF(x_i) \quad (4)$$

其中,当  $x_i = 0$  时,  $IF(0)$  的值为 1, 否则为 0。信号稀疏表示就是通过约束  $x$  的稀疏度提取信号主要特征,从而获得  $y$  的最优近似。然而,由于  $l_0$  范数的非连续性,基于  $l_0$  范数的稀疏表示算法可能陷入局部最优解<sup>[37]</sup>。为了解决这个问题,  $l_1$  范数被用来代替  $l_0$  范数并发挥稀疏正则的作用<sup>[20]</sup>,  $l_1$  范数具有连续和易于求解的优势,可获得全局最优解。但是,基于  $l_1$  范数的稀疏表示算法的计算复杂度较高<sup>[40]</sup>。因此,结合自适应 Gabor 子字典和  $l_p$  范数对超声信号进行稀疏分解与重构,具体流程如图 2 所示。该方法利用 Gabor 原子重构超声信号,原子包含的时频特征给重构信号赋予了物理意义。此外,通过  $l_p$  范数的约束,用于重构信号的字典原子具有相关性和稀疏性的特点,可提取信号主要特征,提高重构信号的精度。

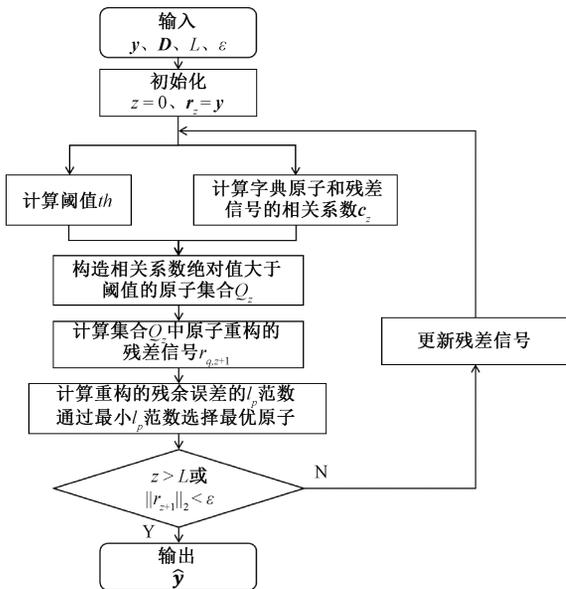


图 2 基于  $l_p$  范数的改进支持匹配追踪算法流程  
Fig. 2 Flow chart of the improved support matching pursuit algorithm based on  $l_p$  norm

基于  $l_p$  范数的改进支持匹配追踪算法的步骤具体为:首先,通过式 (5) 计算残差信号与字典原子的相关系数  $c_z$ 。

$$c_z = D^T r_z \quad (5)$$

式中:  $T$  表示转置;  $r_z$  为残差信号,定义为分段 A 扫描信号与重构信号的差;  $z$  为迭代次数。然后,根据式 (6) 设置阈值  $th$ 。

$$th = \frac{k \|r_z\|_2}{\sqrt{M}} \quad (6)$$

式中:  $k$  的取值范围为  $2 \leq k \leq 3$ <sup>[41]</sup>。选择相关系数绝对值大于阈值  $th$  的所有字典原子,并计算各原子重构的残差信号。

$$Q_z = \{q: |c_z(q)| > th\} \quad (7)$$

$$Q_z: r_{q,z+1} = r_z - c_z(q) d_q \quad (8)$$

式中:  $Q_z$  为满足条件的所有原子的集合;  $c_z(q)$  为向量  $c_z$  的第  $q$  个元素;  $d_q$  是自适应 Gabor 子字典的第  $q$  列。如果  $Q_z$  为空集,则选择相关系数绝对值最大的原子作为最优原子进行稀疏重构,并更新残差信号。如果  $Q_z$  不为空集,则根据式 (9) 计算残差信号的  $l_p$  范数<sup>[41]</sup>。

$$\|r_{q,z+1}\|_p = \left( \sum_{i=1}^M |r(t_i)|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (9)$$

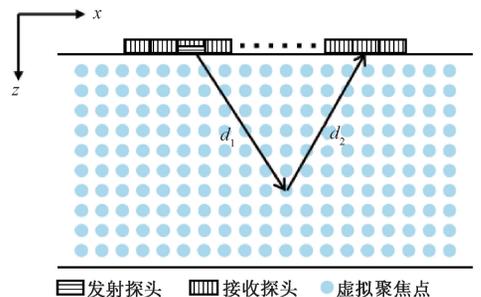
式中:  $0 < p < 1$ 。选择使残差信号  $l_p$  范数最小的字典原子作为最优原子,并更新残差信号。重复上述步骤,直至达到最大预设稀疏度  $L$  或残余误差小于给定值  $\varepsilon$ 。通过上述求解过程实现了信号的稀疏分解,利用自适应 Gabor 子字典  $D$  和解出的稀疏向量  $\hat{x}$ , 可根据式 (10) 对分段 A 扫描信号进行重构。

$$\hat{y} = D \hat{x} \quad (10)$$

将重构的分段 A 扫描信号  $\hat{y}$  按顺序还原回超声 A 扫描信号,得到重构的 FMC 数据。

### 1.3 TFM 成像

TFM 是一种基于 FMC 数据的超声后处理成像技术<sup>[42]</sup>,通过将超声信号聚焦到被测区域的每个点并合成幅值信息,实现整个检测区域的图像表征,其原理如图 3 所示。



发射探头 接收探头 虚拟聚焦点

图 3 TFM 成像  
Fig. 3 TFM imaging

首先计算虚拟聚焦点到发射阵元的距离  $d_1$  和到接收阵元的距离  $d_2$ 。

$$d_1 = \sqrt{(x_i - x)^2 + z^2} \quad (11)$$

$$d_2 = \sqrt{(x_r - x)^2 + z^2} \quad (12)$$

式中:  $x_i$  和  $x_r$  分别表示发射探头和接收探头的横坐标;  $(x, z)$  表示虚拟聚焦点的坐标。然后计算超声波的飞行时间。

$$tof = \frac{d_1 + d_2}{v_l} \quad (13)$$

式中:  $v_l$  为被测试样的纵波声速。针对目标聚焦点,利用延时法则将探头中所有发射-接收阵元组合的超声回波信号在该点叠加,获得表征该点信息的幅值  $I(x, z)$ 。

$$I(x, z) = \sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^N y_{i,r}(tof) \quad (14)$$

式中:  $y_{i,r}(tof)$  表示第  $t$  个探头发射,第  $r$  个探头接收的超声 A 扫描信号在  $tof$  延时上的瞬时幅值;  $N$  表示探头个数。依次得到被测区域内每一个聚焦点的幅值,即可完成整个被测区域内的成像<sup>[43]</sup>。

## 2 实验方法

### 2.1 实验试样

本文测试了尺寸为  $200 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的 HDPE 试样和尺寸为  $50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  的混凝土试样,分别如图 4(a) 和(b) 所示。HDPE 试样有 9 个相同的侧钻孔,每个孔直径为  $1 \text{ mm}$ ,相邻两个孔的垂直间距为  $5 \text{ mm}$ <sup>[18]</sup>。第 1 个孔的中心距离上表面  $5 \text{ mm}$ ,最后一个孔的中心距离下表面  $5 \text{ mm}$ 。混凝土试样有 3 个相同的

侧钻孔,直径均为  $2 \text{ mm}$ ,3 个孔的中心距离上表面分别为  $3, 7$  和  $11.5 \text{ mm}$ ,距离左侧面分别为  $10, 30$  和  $40 \text{ mm}$ 。

### 2.2 实验设置

采用文献[18]中 HDPE 试样的 FMC 数据和实验设置。采用了 64 阵元的线性相控阵超声探头,中心频率为  $2.5 \text{ MHz}$ ,探头间距为  $1 \text{ mm}$ ,详细参数如表 1 所示。该文献中的采样频率为  $62.5 \text{ MHz}$ ,即采样间隔为  $1.6 \times 10^{-8} \text{ s}$ 。本文使用的 FMC 数据为  $3072 \times 64 \times 64 (N_s \times N_r \times N_t)$ ,其中 HDPE 试样中的纵波声速为  $2337 \text{ m/s}$ 。由于在 HDPE 中超声横波的传播距离可以忽略不计,因此本研究仅考虑纵波的传播<sup>[18]</sup>。

表 1 2.5 MHz 线性相控阵超声探头参数<sup>[18]</sup>  
Table 1 Linear ultrasonic phased array parameters of 2.5 MHz

阵列参数	探头
阵元个数	64
中心频率/MHz	2.5
阵元间距/mm	1
阵元宽度/mm	10

混凝土试样的测量在室温  $25^\circ\text{C}$  下进行,使用 64 阵元的线性相控阵超声探头,中心频率为  $5 \text{ MHz}$ ,探头间距为  $0.6 \text{ mm}$ ,详细参数如表 2 所示。将探头按图 5 所示放置在试样的上表面,采样频率为  $100 \text{ MHz}$ ,即采样间隔为  $1 \times 10^{-8} \text{ s}$ 。混凝土试验中使用的 FMC 数据为  $2000 \times 64 \times 64 (N_s \times N_r \times N_t)$ 。其中混凝土试样中的纵波声速设定为  $3000 \text{ m/s}$ 。

表 2 5 MHz 线性相控阵超声探头参数  
Table 2 Linear ultrasonic phased array parameters of 5 MHz

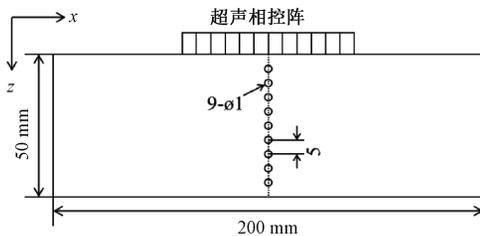
阵列参数	探头
阵元个数	64
中心频率/MHz	5
阵元间距/mm	0.6
阵元宽度/mm	10

## 3 实验结果与讨论

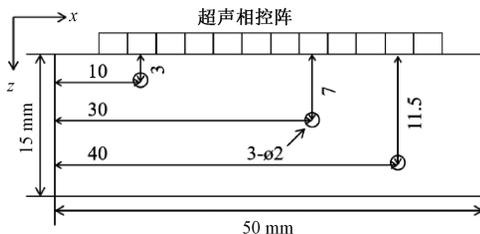
基于采集的 FMC 数据,使用提出的基于改进稀疏表示的方法对超声信号进行预处理,得到稀疏重构后的 FMC 数据,再使用 TFM 算法对重构后的 FMC 数据进行成像,进而获得 HDPE 和混凝土试样的缺陷检测图像。

### 3.1 HDPE 试样检测

以 HDPE 试样中采集的 FMC 数据中的一组超声



(a) 高密度聚乙烯试样  
(a) HDPE test specimen



(b) 混凝土试样  
(b) Concrete test specimen

图 4 实验试样

Fig. 4 Test specimen

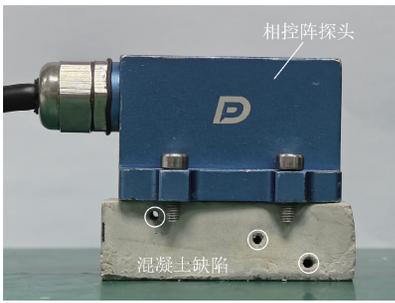


图 5 超声相控阵检测实验设置

Fig. 5 Experimental setup for ultrasonic phased array testing

A 扫描信号为例,图 6(a)对比了实验采集超声 A 扫描信号、经常规稀疏表示处理后的信号以及经改进稀疏表示处理后的信号。图 6(b)显示了从  $4 \times 10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-5}$  s 时间段内超声 A 扫描信号(方框内)的局部放大图。常规稀疏表示和改进稀疏表示抑制了  $7 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$  s、 $11 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-5}$  s 和  $15 \times 10^{-6} \sim 16 \times 10^{-6}$  s 时间段内的噪声,提高了信噪比。此外,以 HDPE 的 FMC 数据(即  $3\ 072 \times 64 \times 64$ )为例,在配置有 Radeon GPU 的 AMD Ryzen 7 5800H CPU @ 3.20 GHz 和 16.0 GB RAM 的 Windows 11 操作系统上处理数据。改进稀疏表示中的 Gabor 字典大小由常规稀疏表示中的  $256 \times 7\ 168$  减小到  $256 \times 2\ 048$ ,运行时间也由 970 s 缩短至 461 s,明显提升了计算效率。

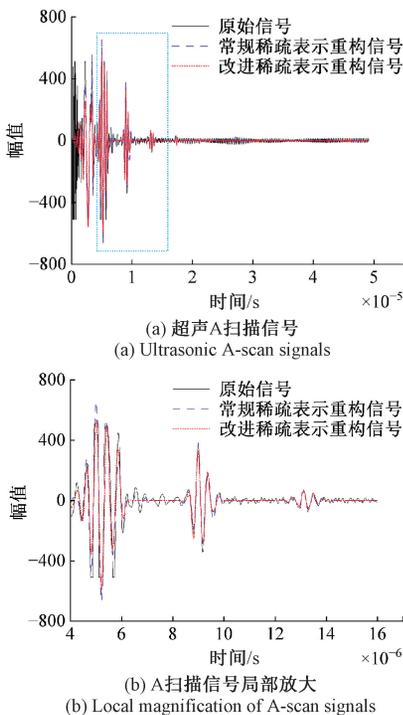


图 6 HDPE 试样超声 A 扫描信号

Fig. 6 Ultrasonic A-scan signals of HDPE specimen

厚度为 50 mm 的 HDPE 试样中原始信号的常规 TFM 成像如图 7(a)所示,从图中可以看出靠近上表面的 7 个缺陷被清晰地重建。然而,靠近底面的 2 个缺陷难以被准确地识别。图 7(b)展示了对原始信号应用常规稀疏表示处理后的 TFM 成像结果,与图 7(a)相比,背景噪声有所减少,图像质量有一定的提升。图 7(c)显示了经过改进稀疏表示处理后的 TFM 成像结果。该图像中背景噪声基本被消除,图像质量明显提高。尽管如此,靠近底部的 2 个缺陷仍难以清晰识别。这主要是因为 HDPE 具有较高的衰减性,使得靠近底面的缺陷信号相对较弱,从而导致重构质量较低。此外,由于相控阵阵列尺寸的制约,检测视角受到限制,这导致接近底面的缺陷直径估计小于实际值<sup>[18]</sup>。后续研究可进一步建立能量衰减模型,分析指向性和扩散声束传播路径上的能量衰减并计算衰减系数,通过自建模型校准的全聚焦算法扩大检测角度范围、改善图像能量的均匀性<sup>[44]</sup>。

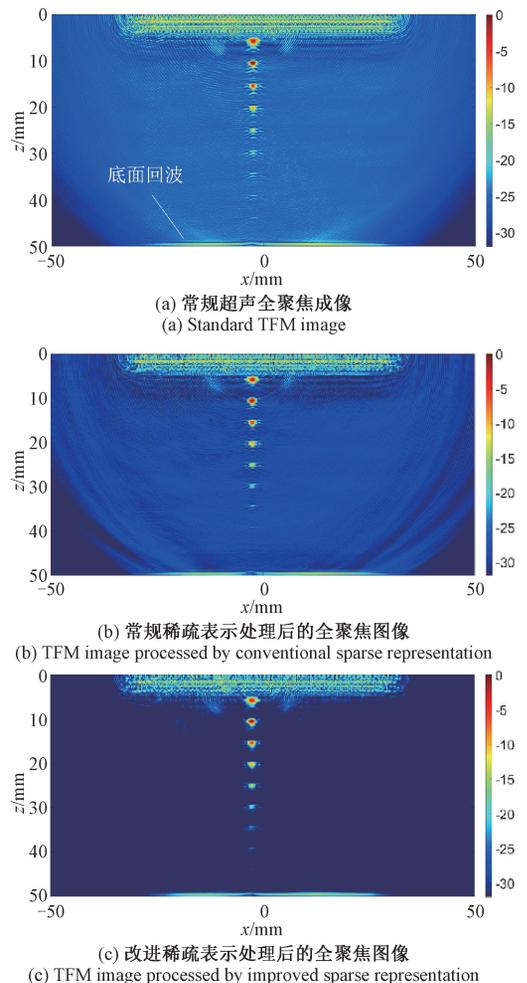


图 7 高密度聚乙烯试样 TFM 图像

Fig. 7 TFM images of HDPE specimen

### 3.2 混凝土试样检测

图8(a)展示了从混凝土试样中采集的 FMC 数据中的一组超声 A 扫描信号。从图中可以看出,近场<sup>[45]</sup>对  $z=3\text{ mm}$  处的近表面缺陷检测产生了影响。因此,本部分首先采用门控技术去除近场影响<sup>[46]</sup>,并在此基础上采用常规稀疏表示和改进稀疏表示方法对信号进行处理。从图8(a)中可以看出,在去除近场影响后,基于常规稀疏表示和改进稀疏表示的信号处理方法均有效重构了超声 A 扫描信号。为了比较重构信号的细节,对  $5\times 10^{-6}\sim 12\times 10^{-6}\text{ s}$  时间段内的局部信号(方框内)进行放大,如图8(b)所示。经过常规稀疏表示和改进稀疏表示处理后的信号抑制了  $5\times 10^{-6}\text{ s}$  附近和  $8\times 10^{-6}\sim 10\times 10^{-6}\text{ s}$  时间段内的噪声。在处理混凝土 FMC 数据时,Gabor 字典大小由常规稀疏表示中的  $256\times 7\ 168$  减小到改进稀疏表示中的  $256\times 3\ 584$ ,计算时间也相应缩短了 20%。

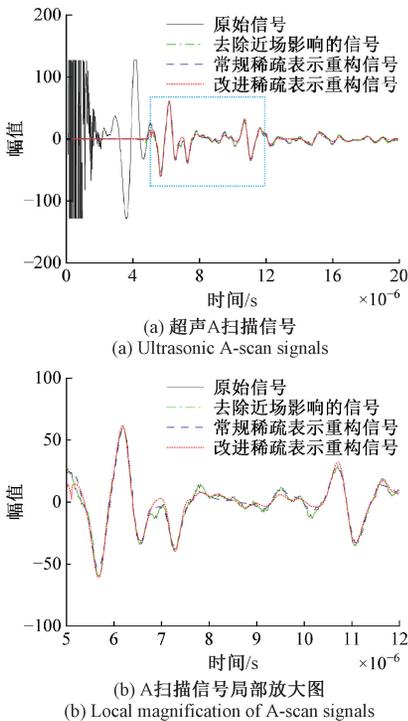


图8 混凝土试样超声 A 扫描信号

Fig. 8 Ultrasonic A-scan signals of concrete specimen

混凝土试样的常规 TFM 成像如图9(a)所示,从图中可以看出,重建出的缺陷分别位于  $z=7.8$  和  $12.3\text{ mm}$ 。与缺陷的真实位置  $z=7$  和  $11.5\text{ mm}$  相比(圆圈标注),位置出现下移。由于近场的影响,位于  $z=3.8\text{ mm}$  处的缺陷难以识别<sup>[15]</sup>。去除近场影响后的 TFM 图像如图9(b)所示,与图9(a)相比,位于  $z=3.8\text{ mm}$  处的缺陷更容易识别。图9(c)显示了经过常规稀疏表示处理后的 TFM 图像结果,图中的大部分背景噪声已被消除,使得位于  $z=7.8$  和  $12.3\text{ mm}$  处的缺陷能够被清晰地识别。经过改

进稀疏表示处理后的 TFM 成像结果如图9(d)所示,与图9(c)相比,图中的背景噪声几乎全部被去除。尽管如此,缺陷位置与形状估计与真实值有一定偏差。这主要是由于混凝土试样在加工过程中的不均匀性,导致实际声速受到影响<sup>[47]</sup>,并非在所有位置均为固定的  $3\ 000\text{ m/s}$ 。此外,门控技术在消除近场影响的同时也去除了部分靠近表面缺陷有效信号。针对近表面缺陷检测的问题,后续研究可采用一种自适应噪声抵消方法,通过最小化参考信号和原始信号的误差,抵消近场干扰,提取近表面缺陷信号<sup>[48]</sup>。

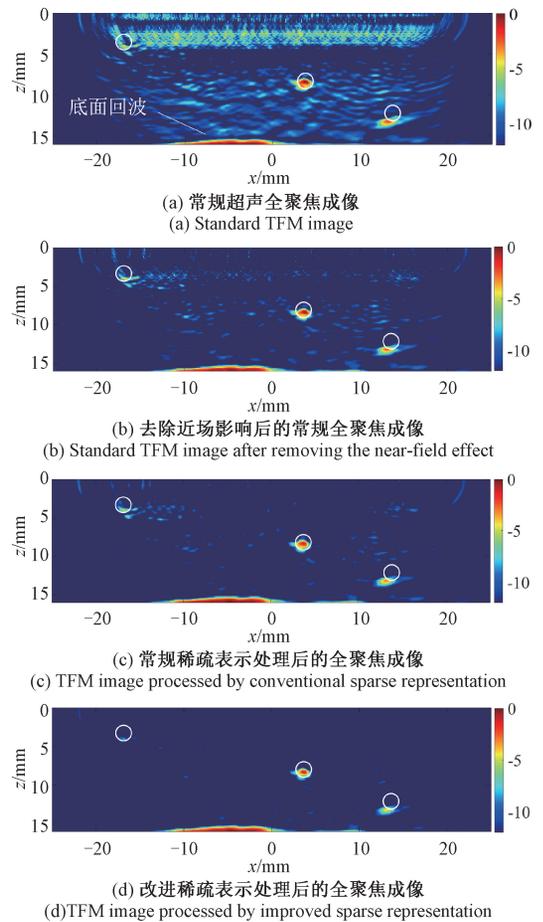


图9 混凝土试样 TFM 图像

Fig. 9 TFM images of concrete test specimen

## 4 结 论

本研究提出了一种基于改进稀疏表示的超声信号处理方法,用于提高高密度聚乙烯和混凝土等高衰减厚壁结构的超声缺陷检测。该方法首先对超声信号进行分段处理,并根据信号的时频特性设计自适应 Gabor 子字典,再采用基于  $l_p$  范数的改进支持匹配追踪算法对分段信号进行稀疏分解与重构,有效提取缺陷特征并显著提高信

噪比。实验结果表明,所提出的方法较常规稀疏表示在提取缺陷特征、提高信噪比及运行效率方面具有优势。自适应 Gabor 子字典不仅减小了字典矩阵的尺寸,而且提高了字典的适应性,有效解决了常规稀疏表示中的内存占用大和运行效率低的问题。在此基础上,利用超声全聚焦成像算法重建了 HDPE 和混凝土试样内部缺陷的图像,验证了所提方法在超声检测高衰减厚壁结构中的有效性。

## 参考文献

- [1] 周路生, 黄骄, 吴双, 等. 核电厂厚壁高密度聚乙烯管道热熔接头的相控阵超声检测[J]. 无损检测, 2022, 44(1): 10-15.  
ZHOU L SH, HUANG J, WU SH, et al. Phased array ultrasonic testing for hot melt joint of thick wall high density polyethylene pipe in nuclear power plant[J]. Nondestructive Testing, 2022, 44(1): 10-15.
- [2] LOWE P S, LAIS H, PARUCHURI V, et al. Application of ultrasonic guided waves for inspection of high density polyethylene pipe systems[J]. Sensors, 2020, 20(11): 3184.
- [3] WANG Q, ZHOU H T, XIE J W, et al. Nonlinear ultrasonic evaluation of high-density polyethylene natural gas pipe thermal butt fusion joint aging behavior[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 189: 104272.
- [4] 汪隆臻, 张文亮, 赵骞, 等. 基于混凝土缺陷超声检测的合成孔径聚焦成像[J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(3): 463-472.  
WANG L ZH, ZHANG W L, ZHAO Q, et al. Synthetic aperture focusing imaging for ultrasonic testing of concrete defect[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2024, 21(3): 463-472.
- [5] TSENG CH W, CHANG Y F, WANG CH Y. Total focusing method or phased array technique: Which detection technique is better for the ultrasonic nondestructive testing of concrete? [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(1): 04017256.
- [6] ZHANG J R, ZHANG M X, DONG B Q, et al. Quantitative evaluation of steel corrosion induced deterioration in rubber concrete by integrating ultrasonic testing, machine learning and mesoscale simulation[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 128: 104426.
- [7] 秦胤康. 核电站高密度聚乙烯管道热熔接头的超声相控阵检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
QIN Y K. Research on phased array ultrasonic testing of high density polyethylene pipe butt fusion joint in nuclear power plant[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [8] 彭伊娟, 王振超, 张秋菊. 改进的 Faster-RCNN 算法在聚乙烯管接头内部缺陷检测中的应用[J]. 应用声学, 2023, 42(5): 984-992.  
PENG Y J, WANG ZH CH, ZHANG Q J, et al. Application of improved Faster-RCNN algorithm in internal defect detection of polyethylene pipe joint[J]. Journal of Applied Acoustics, 2023, 42(5): 984-992.
- [9] QIN Y K, SHI J F, ZHENG J Y, et al. An improved phased array ultrasonic testing technique for thick-wall polyethylene pipe used in nuclear power plant[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2019, 141(4): 041403.
- [10] YANG W F, WANG Q, HOU Y T, et al. Analysis and denoising of electric noise in phased array ultrasonic testing system[J]. NDT & E International, 2024, 146: 103164.
- [11] 张敏婧, 赵英亮, 王黎明, 等. 基于改进 STA/LTA 的高精度超声测厚方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(10): 117-122.  
ZHANG M J, ZHAO Y L, WANG L M, et al. Research on high precision ultrasonic thickness measurement method based on improved STA/LTA [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(10): 117-122.
- [12] ZATAR W, CHEN G, NGHIEM H, et al. Ultrasonic pulse-echo signals for quantitative assessment of reinforced concrete anomalies [J]. Applied Sciences, 2024, 14(11): 4860.
- [13] WU Y Q, WANG Y P, LI D, et al. Two-step detection of concrete internal condition using array ultrasound and deep learning[J]. NDT & E International, 2023, 139: 102945.
- [14] WANG Y, LI G W, ZHOU L, et al. Optimization of tunnel grouting detection technology based on ultrasonic phased array[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(8): 086126.
- [15] RAO J, ZENG L, LIU M L, et al. Ultrasonic defect detection of high-density polyethylene pipe materials using FIR filtering and block-wise singular value decomposition[J]. Ultrasonics, 2023, 134: 107088.
- [16] AGRAWAL N, KUMAR A, BAJAJ V, et al. Design of digital IIR filter: A research survey[J]. Applied Acoustics, 2021, 172: 107669.
- [17] 彭永恒, 周国发, 黄鑫慧. 基于傅立叶变换和奇异值分解的路面脱空判定[J]. 路基工程, 2010(6): 16-19.  
PENG Y H, ZHOU G F, HUANG X H. Pavement void identification based on Fourier transform and singular value decomposition[J]. Subgrade Engineering,

- 2010(6): 16-19.
- [18] RAO J, QIU H Y, TENG G Y, et al. Ultrasonic array imaging of highly attenuative materials with spatio-temporal singular value decomposition[J]. *Ultrasonics*, 2022, 124: 106764.
- [19] BARANGER J, ARNAL B, PERREN F, et al. Adaptive spatiotemporal SVD clutter filtering for ultrafast Doppler imaging using similarity of spatial singular vectors[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2018, 37(7): 1574-1586.
- [20] FUENTES R, MINEO C, PIERCE S G, et al. A probabilistic compressive sensing framework with applications to ultrasound signal processing[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 117: 383-402.
- [21] 李志星, 李天昊. 基于多因子进化稀疏重构的轴承故障诊断研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(6): 161-170.
- LI ZH X, LI T H. Research on bearing fault diagnosis based on multi-factor evolutionary sparse reconstruction[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(6): 161-170.
- [22] 王爽, 丁传仓, 曹懿, 等. 加权多尺度卷积稀疏表示及其在滚动轴承复合故障诊断中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(5): 197-207.
- WANG SH, DING CH C, CAO Y, et al. Weighted multi-scale convolutional sparse representation and its application in rolling bearing compound fault diagnosis[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(5): 197-207.
- [23] LIU Y Y, ZHOU R Q, WANG ZH G, et al. Ultrasonic detection of aliased signal separation based on adaptive feature dictionary and K-SVD algorithm for protective coatings of assembled steel structure[J]. *Coatings*, 2023, 13(7): 1239.
- [24] 张家玮, 焦敬品, 陈昌华, 等. 一种用于超声信号降噪的非凸变量重叠群稀疏变分方法[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(4): 234-245.
- ZHANG J W, JIAO J P, CHEN CH H, et al. An ultrasonic signal denoising method using overlapping group sparse variational processing based on non-convex penalty function[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(4): 234-245.
- [25] QI AI L, ZHANG G M, DONG M, et al. An artificial bee colony optimization based matching pursuit approach for ultrasonic echo estimation[J]. *Ultrasonics*, 2018, 88: 1-8.
- [26] SU L, TAN SH H, QI Y, et al. An improved orthogonal matching pursuit method for denoising high-frequency ultrasonic detection signals of flip chips[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 188: 110030.
- [27] FERNANDEZK, ROJAS E, BALTAZAR A, et al. Detection of torsional guided wave generation using macro-fiber composite transducers and basis pursuit denoising[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2021, 91(5): 1945-1958.
- [28] WANG D, LI H H, WEI X Y, et al. An efficient iterative thresholding method for image segmentation[J]. *Journal of Computational Physics*, 2017, 350: 657-667.
- [29] SANDHU A I, SHAUKAT S A, DESMAL A, et al. ANN-assisted CoSaMP algorithm for linear electromagnetic imaging of spatially sparse domains[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(9): 6093-6098.
- [30] SONG L, YAN R Q. Bearing fault diagnosis based on cluster-contraction stage-wise orthogonal-matching-pursuit[J]. *Measurement*, 2019, 140: 240-253.
- [31] XIANG J X, DONG Y G, YANG Y J. FISTA-Net: Learning a fast iterative shrinkage thresholding network for inverse problems in imaging[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2021, 40(5): 1329-1339.
- [32] 郑凯, 吴军, 吴胜平, 等. 基于超声相控阵的聚乙烯管道缺陷信号重构方法研究[J]. *计算机测量与控制*, 2023, 31(9): 247-252.
- ZHENG K, WU J, WU SH P, et al. Research on reconstruction method of polyethylene pipeline defect signal based on ultrasonic phased array[J]. *Computer Measurement & Control*, 2023, 31(9): 247-252.
- [33] 吴彪. 超声无损检测缺陷定位与稀疏信号重构方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- WU B. Flaw detection and sparse signal reconstruction for ultrasonic nondestructive testing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [34] 宿磊, 谈世宏, 吉勇, 等. 基于训练局部字典的倒装芯片高频超声检测信号稀疏去噪方法[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(6): 10-17.
- SU L, TAN SH H, JI Y, et al. Sparse denoising method for high-frequency ultrasonic detection signals of flip chip based on training local dictionary[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(6): 10-17.
- [35] WU B, HUANG Y, CHEN X, et al. Guided-wave signal processing by the sparse Bayesian learning approach employing Gabor pulse model[J]. *Structural Health Monitoring*, 2017, 16(3): 347-362.
- [36] QI AI L, BAI B W, ZHANG G M. Ultrasonic signal denoising technology based on SMP algorithm[C]. *Journal of Physics: Conference Series*. Institute of Physics Publishing, 2020, 1550(2): 022012.

- [37] WU B, ZHOU W S. Ultrasonic defect detection in noisy signals by a nonconvex sparse regularization approach[J]. *Applied Acoustics*, 2023, 210: 109461.
- [38] WANG H T, ZHANG G M, MA H W, et al. A multiresolution sparse signal representation approach for the decomposition of overlapping echoes in complex ultrasonic signals [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 219: 111593.
- [39] ZHANG X, LIU ZH W, WANG L, et al. Bearing fault diagnosis based on sparse representations using an improved OMP with adaptive Gabor sub-dictionaries[J]. *ISA Transactions*, 2020, 106: 355-366.
- [40] ZHANG ZH, XU Y, YANG J, et al. A survey of sparse representation: Algorithms and applications [J]. *IEEE Access*, 2015, 3: 490-530.
- [41] MOR E, AZOULAY A, ALADJEM M. A matching pursuit method for approximating overlapping ultrasonic echoes[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2010, 57(9): 1996-2004.
- [42] 张鑫宇, 范惜梅, 李忠虎, 等. 管道超声相控阵全聚焦成像仿真及算法优化[J]. *电子测量技术*, 2024, 47(6): 151-156.  
ZHANG X Y, FAN X M, LI ZH H, et al. Simulation and optimization of ultrasonic phased array full-focus imaging for pipe[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(6): 151-156.
- [43] 周进节, 郑阳, 张宗健, 等. 缺陷散射对相控阵超声全聚焦成像的影响研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(2): 454-461.  
ZHOU J J, ZHENG Y, ZHANG Z J, et al. Research on the effect of defect scattering on phased array ultrasonic TFM imaging[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(2): 454-461.
- [44] 周正干, 彭地, 李洋, 等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(10): 1-7.  
ZHOU ZH G, PENG D, LI Y, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(10): 1-7.
- [45] LOSHELDER A E, HE J Z, AKTHARUZZAMAN M, et al. Apex-shifted Radon transform for baseline-subtraction-free (BSF) damage scattered wave extraction[J]. *Structural Health Monitoring*, 2023, 22(6): 3604-3622.
- [46] RAO J, SAINI A, YANG J ZH, et al. Ultrasonic imaging of irregularly shaped notches based on elastic reverse time migration [J]. *NDT & E International*,

2019, 107: 102135.

- [47] 孙采鹰, 张孟喜, 张飞, 等. 新拌混凝土均匀度的超声检测[J]. *无损检测*, 2024, 46(2): 10-14.  
SUN C Y, ZHANG M X, ZHANG F, et al. Ultrasonic testing of fresh concrete uniformity [J]. *Nondestructive Testing*, 2024, 46(2): 10-14.
- [48] 杜文杰, 郑慧峰, 沈超, 等. 金属板材近表面缺陷远聚焦像素成像方法研究[J]. *传感技术学报*, 2024, 37(5): 862-868.  
DU W J, ZHENG H F, SHEN CH, et al. Research on far-focused pixel-based imaging method of near-surface defects in metal plate[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2024, 37(5): 862-868.

## 作者简介



周至伟, 2021年于武汉理工大学获得学士学位, 现为北京航空航天大学的硕士研究生, 主要研究方向为超声信号处理及成像。

E-mail: zzw15272196889@163.com

Zhou Zhiwei received his B.Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2021.

He is currently a master student at Beihang University. His main research interests include ultrasonic signal processing and imaging.



饶静(通信作者), 现为北京航空航天大学教授, 博士生导师, 洪堡学者。博士毕业于南洋理工大学, 曾为澳大利亚新南威尔士大学助理教授, 主要研究方向为无损检测、信号处理与结构健康检测。

E-mail: jingrao@buaa.edu.cn

Rao Jing (Corresponding author) is currently a professor at Beihang University. She received her Ph.D. degree from Nanyang Technological University and was a Humboldt Research Fellowship holder at the Technical University of Munich in Germany. She is also an assistant professor at the University of New South Wales in Australia. Her main research areas include non-destructive testing, signal processing, and structural health monitoring.



牛伟, 2013年于西北工业大学获得博士学位, 现为西安航空计算技术研究所正高级工程师, 主要研究方向为预测与健康管理工作、嵌入式系统技术等。

E-mail: weiniu@126.com

Niu Wei received his Ph.D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2013. He currently works as a senior engineer at the Xi'an Aeronautical Computing Technology Research Institute. His main research areas include prediction and health management technology, embedded system technology.