

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209369

## 管道缺陷检测全聚焦数据处理及成像方法研究\*

李靖<sup>1,2</sup> 李忠虎<sup>1,2</sup> 张鑫宇<sup>3</sup> 王金明<sup>1,2</sup>(1.内蒙古科技大学信息工程学院 包头 014010; 2.内蒙古自治区光热与风能发电重点实验室 包头 014010;  
3.内蒙古科技大学机械工程学院 包头 014010)

**摘要:** 管道缺陷检测是保证管道系统安全运行的必要手段,本文采用全聚焦成像的方法对管道缺陷进行成像与识别。利用有限元软件 ABAQUS 对基于  $L(0,1)$  模态导波的管道缺陷检测方法进行数值模拟研究,利用中值滤波、希尔伯特变换及信号包络锐化方法对信号进行预处理,然后用处理后的信号构建全矩阵数据,最后利用全聚焦算法实现缺陷成像,最终显示成像结果。实验结果表明,将信号进行预处理后再成像,可有效提高分辨率,实现缺陷的高精度可视化。

**关键词:** 管道缺陷;超声导波;信号处理;全聚焦成像

**中图分类号:** TB559 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 14020

Pipeline defect detection full focus data processing and imaging  
method researchLi Jing<sup>1,2</sup> Li Zhonghu<sup>1,2</sup> Zhang Xinyu<sup>3</sup> Wang Jinming<sup>1,2</sup>(1. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;  
2. Key Laboratory of Solar Thermal and Wind Power Generation of Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou 014010, China;  
3. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** Pipeline defect detection is a necessary means to ensure the safe operation of pipeline system, and this paper uses the method of full focus imaging to image and identify pipeline defects. The finite element software ABAQUS is used to conduct numerical simulation of the pipeline defect detection method based on  $L(0,1)$  modal guided wave, and the signal is preprocessed by median filtering, Hilbert transformation and signal envelope sharpening method, and then the processed signal is used to construct the full matrix data, and finally the defect imaging is realized by the full focusing algorithm, and the imaging results are finally displayed. Experimental results show that the signal is pre-processed and then imaged, which can effectively improve the resolution and achieve high-precision visualization of defects.

**Keywords:** pipeline defects; ultrasonic guided wave; signal processing; fully focused imaging

## 0 引言

管道运输是重要的流体运输方式,在石油、化工、冶金、电力及城市供水和供气等诸多行业有着广泛的应用。因受材料腐蚀、介质磨损和外力作用等因素的影响,管道泄漏事故时有发生,故对在役管道进行定期检测评估具有重要的现实意义。在管道缺陷检测方面,传统的检测方法有电涡流法、超声法、漏磁法等,近年来,管道缺陷成像检测技术已逐渐引起研究人员的高度关注,成为新的研究热点。

超声相控阵检测<sup>[1]</sup>作为目前常用的一种无损检测方

式,具有灵活的声束可控性和高分辨率成像等优势,已应用于多个领域<sup>[2-3]</sup>。与传统的超声相控阵检测法相比,超声全聚焦(total focusing method, TFM)法可实现重点检测区域任意点的全聚焦成像<sup>[4]</sup>,具有显著的优势。池强强等<sup>[5]</sup>基于超声相控阵原理及全聚焦算法检测钢板缺陷,有效实现钢板缺陷的可视化检测,但是只用原始信号成像,并没有对信号进行处理成像。马立印等<sup>[6-7]</sup>通过超声相控阵建模实现对发动机叶片的检测,并进行可行性验证,此方法需要性能良好的超声换能器,并且成像需要移动换能器位置和角度。陈汉新等<sup>[8]</sup>检测带有焊缝的元件,对其进行相应的仿

收稿日期:2022-03-23

\* 基金项目:国家自然科学基金(62161042)项目资助

真,检测结果与实验结果相符,但是只检测了元件焊缝,没有检测缺陷的受损情况。近年来,由于超声相控阵检测和全聚焦成像算法的迅速发展,已在无损检测领域取得了良好的效果,国外 SAMPATH 等<sup>[9]</sup>利用超声回波检测成像,利用 FMC 方法实现数据采集,避免重复采集,降低成本,但是没有使用信号处理的重构 FMC 矩阵。沙正骁等<sup>[10]</sup>研究微小缺陷回波信号的成像,利用计算缺陷回波信号的 PSD 和 IBS 实现缺陷小信号处理,提高成像精度。艾诗迪等<sup>[11]</sup>通过改进的概率成像法提高成像精度。陈尧等<sup>[12-13]</sup>采用一种动态加权方法实现信号噪声抑制,提高了成像分辨率。Weston 等<sup>[14]</sup>将补偿校准角度与深度的方法用于阵列全聚焦成像,研究如何提高成像质量。上述提高成像质量的方法没有结合 TFM 算法实现成像,还不能验证成像精度提高质量如何以及用于 TFM 成像的可操作性是否可行。

本文采用超声导波检测管道缺陷,构建全矩阵数据,采用中值滤波、希尔伯特变换、信号包络锐化进行信号预处理,最终实现管道缺陷的可视化。

## 1 管道超声导波数值仿真建模及参数设置

### 1.1 建立仿真模型

ABAQUS/standard 模块可以实现动力学显示分析,利用有限元软件 ABAQUS 建立直管道模型进行有限元分析。建立长度为 2 m、壁厚为 3 mm、直径为 206 mm 的管道模型,管道材料选用 Q235,密度  $\rho = 7\ 850\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,弹性模量  $E = 210\ \text{GPa}$ ,泊松比  $\mu = 0.27$ 。

使用 ABAQUS 中的 part 功能模块设置缺陷,在管道 1 m 处设置轴向宽度 2 mm,周向长度 5 mm,径向深度 1 mm 的缺陷,然后对管道缺陷实现全聚焦成像。设置管道表面单缺陷,采集数据实现缺陷的成像研究。

为了提高管道数值模拟的准确性,管端均匀加载 8 个集中力激励载荷,载荷之间的夹角为  $45^\circ$ ,激励加载如图 1 所示,8 个激励依次加载信号。

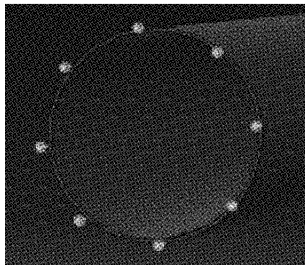


图 1 激励载荷加载图

### 1.2 激励信号参数设置

根据绘制的管道频散曲线, $L(0,1)$ 模态在低频阶段频散较弱,可用于管道缺陷的检测。端部施加经过汉宁窗调制的激励信号:

$$f(t) = \begin{cases} (1 - \cos \frac{2\pi f_c t}{n}) \sin 2\pi f_c t, & 0 < t < \tau \\ 0, & t > \tau \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n$ 为脉冲周期; $f_c$ 为中心频率; $\tau = \frac{n}{f_c}$ 为信号脉冲宽度。

本文选用中心频率为 35 kHz 的 10 个周期的汉宁窗调制信号。

### 1.3 网格划分以及边界条件设置

为了使仿真结果更加精确,网格划分以及边界条件的设置就显得尤为重要。根据波的波动效应,一个波长传播方向至少有 10 个单元,网格单元长度  $l$  需要满足:

$$l = \frac{c}{10f_c} \quad (2)$$

式中: $c$ 为导波速度; $f_c$ 为中心频率。

网格单元长度取 1.5 mm;采样时间间隔为  $3e^{-7}\text{s}$ ,无缺陷管道部分使用结构化网格划分,单元类型为六面体单元 C3D8,缺陷部分使用自由网格划分,单元类型为四面体单元。管道截面网格划分为两层,单元厚度为 1.5 mm,如图 2 所示。

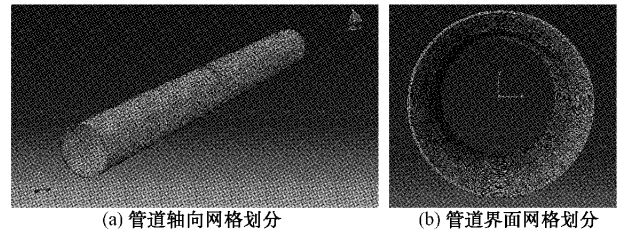


图 2 ABAQUS 钢管网格划分

管道边界条件的设置关系着计算结果的准确性,管道末端需设置成全固定方式,将管道的内壁和外壁固定五个自由度,使得波在管道内部更好的传播。本模型是建立在基于管道外部理想的真空条件,便于后续导波对管道缺陷检测的周向定位研究。

## 2 全聚焦成像数据采集及成像算法研究

### 2.1 管道缺陷全聚焦成像数据采集

为了实现管道缺陷成像,首先需要采集超声导波回波信号,然后使用全聚焦成像算法对信号进行后处理,可以实现缺陷成像。

全聚焦成像是一种超声后处理的成像方式,基于的是 FMC 理论。全聚焦成像方法最关键的是如何采集全矩阵数据。首先设置超声换能器的单元位置作为相控阵的阵元。一般相控阵的阵元设置有  $n$  个,这  $n$  个阵元需要逐一激发超声导波信号,然后所有  $n$  个阵元都作为信号接收阵元,将每个阵元接收到的数据进行储存,这样便得到  $n \times n$  的全矩阵数据,如图 3 所示。

本文研究管道缺陷的全聚焦成像,将 8 个阵列传感器

	1	...	$j$	...	$n$
1	$S_{11}$	...	$S_{1j}$	...	$S_{1n}$
...	...	...	...	...	...
$j$	$S_{j1}$	...	$S_{jj}$	...	...
...	...	...	...	...	...
$n$	$S_{n1}$	...	...	...	$S_{nn}$

图 3 采集到的全矩阵数据

均匀设置在管道一端,作为全矩阵的 8 个阵元,依次激发超声导波信号。鉴于管道的形状问题,可以将管道壁展开成为长方形,进行全聚焦的数据采集,将采集回来的数据作为全矩阵数据,便于后续的缺陷成像。

## 2.2 管道缺陷全聚焦成像算法

采用全聚焦成像算法将全矩阵数据聚焦到管道被测区域内任意点,可以将管道的任意缺陷成像,实现缺陷的图像表征。本文以 2 m 长的管道为研究对象,研究管道缺陷的全聚焦成像,需要将管道的管壁展开为长方形,TFM 成像算法如图 4 所示。

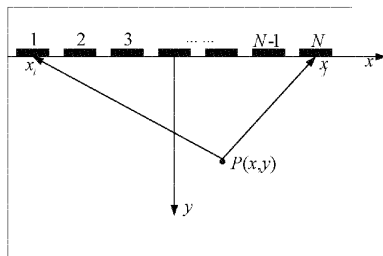


图 4 全聚焦成像算法示意图

以相控阵的阵元中心为原点建立直角坐标系,  $P$  点是检测区域的任意一点,坐标为  $(x, y)$ , 计算此点到各阵元的距离,这样就可以在收集到的阵元数据中确定此点的信号幅值,对应全矩阵数据  $S_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$ ), 将各阵元激发所有阵元接收的信号幅值叠加,就可以获得该点的信号幅值  $I(x, y)$ , 然后计算被测区域所有像素点的信号幅值,这样便可采用全聚焦成像算法得到检测区域每点的成像。

被测区域中的每个像素点的幅值  $I(x, y)$  表示为:

$$I(x, y) = \sum_j \sum_i S_{ij} [t_{ij}(x, y)] \quad (3)$$

式中:  $S_{ij}$  为阵元  $i$  激励、阵元  $j$  接收的超声导波信号中检测区域任意一点  $P$  的信号幅值;  $t_{ij}(x, y)$  为激励阵元发射的超声导波经过  $P$  点之后再次被阵元接收的整个时间,定义为:

$$t_{ij}(x, y) = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + y^2} \pm \sqrt{(x-x_j)^2 + y^2}}{c} \quad (4)$$

式中:  $c$  为超声导波在检测物体中的传播速度;  $x_i$  为激励超声导波阵元的横坐标;  $x_j$  为接收激励超声导波信号的阵元横坐标。

本文将管道壁视为平面图形,然后根据全聚焦算法,使用 MATLAB 编写全聚焦成像算法程序,然后将 ABAQUS 模拟采集的管道缺陷超声导波数据导入 MATLAB 中,最后实现管道缺陷的全聚焦成像。

## 3 超声导波信号预处理

为了实现管道缺陷的高分辨率成像,需要对管道超声导波信号进行中值滤波、希尔伯特变换处理以及信号锐化处理,信号预处理之后再重建 FMC 矩阵,便可以对管道缺陷进行高分辨率成像。

由于实际检测会受到环境噪声干扰,因此为了更真实地模拟实际信号,在原始仿真信号基础上加入 50 dB 的噪声,使其更接近真实的测试信号,原始仿真信号和加入 50 dB 噪声的信号如图 5 所示。

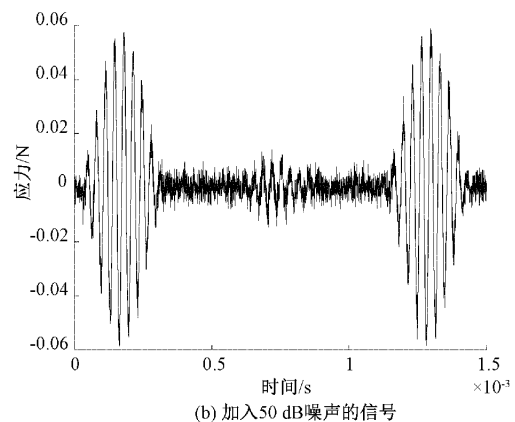
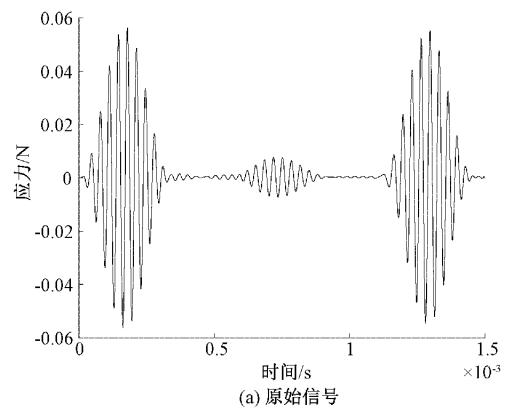


图 5 超声导波信号

### 3.1 中值滤波

中值滤波属于一种非线性的数字滤波技术,可以对图像及信号进行降噪处理,采用奇数个采样实现降噪功能。原始信号加入噪声之后就会产生噪声的干扰,但是与实际采集到的超声信号相比更为接近,有利于实现最后的成像

结果以及与实际成像结果进行比较。但是噪声的加入一定会直接影响全聚焦成像的精度,在此利用中值滤波算法实现信号的降噪处理,处理结果如图 6 所示。由图可知,经过中值滤波降噪后,可有效滤除信号中的噪声,提取出的有效信号更接近原始信号,有利于提高成像分辨率。

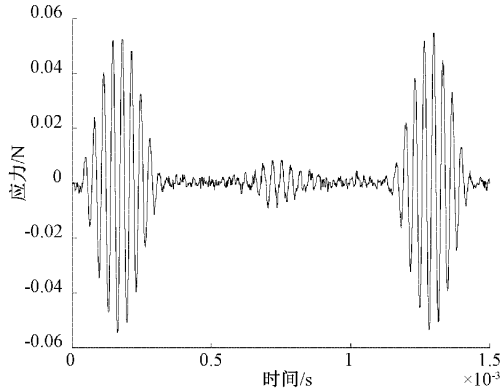


图 6 中值滤波降噪后的信号

### 3.2 希尔伯特信号处理

通过数值模拟采集的超声导波信号比较复杂,可以采用 Hilbert 将信号进行解析,以获得原始信号的包络信号,以便后续进行特征提取和管道周向缺陷辨识。首先对于一个实信号  $x(t)$  进行希尔伯特变换为:

$$\tilde{x}(t) = x(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (5)$$

式中: \* 为卷积运算,相当于一个正交滤波器。

求得的频域特性为:

$$\hat{X}(\omega) = X(\omega)H(\omega) \quad (6)$$

$$H(\omega) = \begin{cases} -j, & \omega \geq 0 \\ +j, & \omega < 0 \end{cases} \quad (7)$$

由上式可以看出,希尔伯特变换对所有的正频率分量移相  $-90^\circ$ ,所有的负频率分量移相  $+90^\circ$ ,为一个正交滤波器,幅值并没有发生改变。

构造解析信号,将使信号变成复信号,原信号的值要成为实部,然后经过希尔伯特变换的信号作为虚部,便可以得到:

$$\tilde{x}(t) = x(t) + j\hat{x} \quad (8)$$

$$x(t) = A(t)\cos(\omega_0 t + \theta(t)) \quad (9)$$

超声导波的采集信号既需要相位信息也需要包含幅值信息,所以可以带入解析信号:

$$\tilde{x}(t) = A(t)\cos(\omega_0 t + \theta(t)) + jA(t)\sin(\omega_0 t + \theta(t)) \quad (10)$$

这样便可以得到包络信号,希尔伯特变换结果如图 7 所示。

经过希尔伯特变换后可以有效提取信号的重要信息,而且不会淹没有用信号。取得包络信号之后再对信号进行放大,更有利于缺陷的识别。

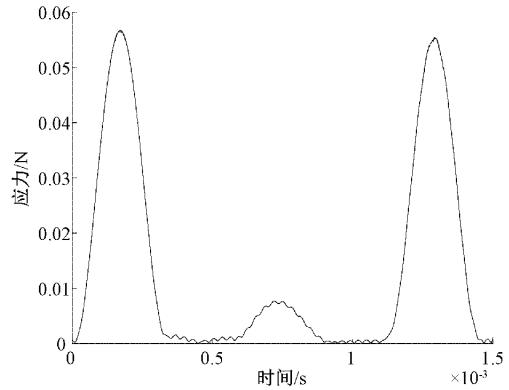


图 7 希尔伯特变换后的信号

### 3.3 信号锐化处理

与原始信号相比较,希尔伯特变换后的信号频率降低、峰值变宽,如果直接进行全聚焦成像,则会影响最后的缺陷成像结果,故必须采取信号锐化方法对信号进行进一步处理。

根据超声导波的全聚焦成像算法原理,保留缺陷的反射信号,在信号中提取幅值较高的部分,降低缺陷反射信号周围的信号幅值,信号锐化处理之后的信号极大值将会变的更加尖锐,锐化处理结果如图 8 所示。

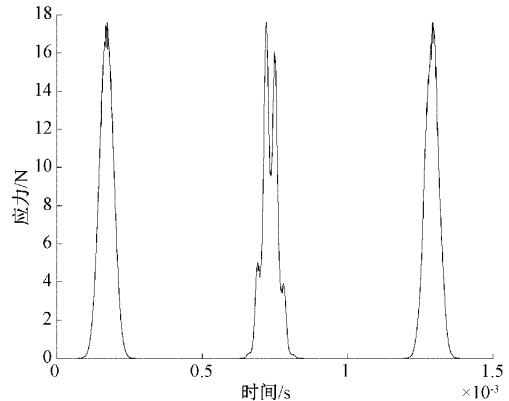


图 8 一次锐化处理的信号

管道单缺陷中的信号大致分为三部分,分别是信号的激励波、缺陷的反射波以及信号的端面回波。将信号分割成三部分,分别求取各部分的极值,设  $k(x)$  为任一子信号,极值为  $K$ ,则锐化处理后的结果  $z(x)$  为:

$$z(x) = [k(x)/K]^m \cdot K \quad (11)$$

式中:  $m$  为锐化处理系数。

为了凸显缺陷信号,使得缺陷成像精度更高,将信号再次进行锐化处理,二次锐化处理得到的结果如图 9 所示。

全矩阵信号经过上述的滤波、希尔伯特变换取包络及锐化处理,然后重构超声导波全矩阵数据。

## 4 管道缺陷 TFM 成像

经上述算法实现信号的预处理后,使用 MATLAB 软

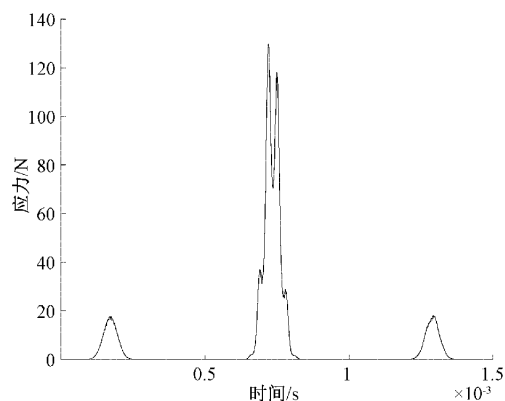


图 9 二次锐化处理的信号

件编写相应的程序,利用全聚焦算法对管道缺陷进行成像,分别观察各个信号的成像效果。管道单缺陷的原始信号成像结果如图 10 所示。单缺陷成像的缺陷位置位于 1 000~1 150 mm 之间,周向位置位于 200°~230°之间,可以确定管道缺陷的位置,并且实现缺陷可视化。

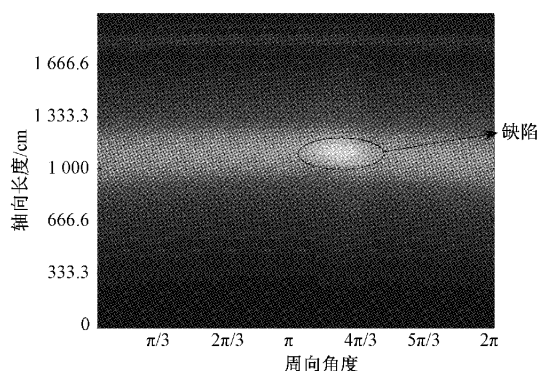


图 10 原始信号成像结果(1 000 mm 处 3 600 像素聚焦图)

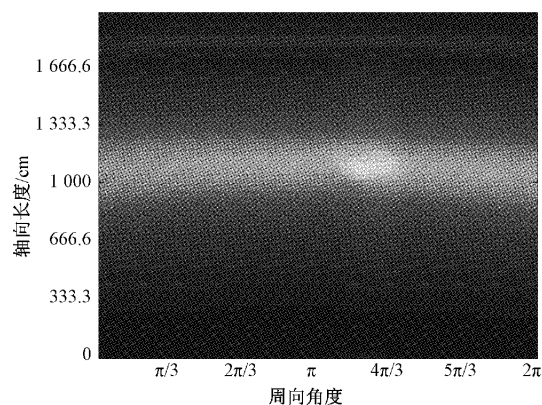
为了验证对超声导波信号预处理可以有效提高缺陷成像精度,分别对原始信号加入噪声信号,其次进行滤波处理、包络锐化处理,分别进行 TFM 成像。

首先研究噪声对缺陷成像的影响以及滤波后的成像结果。对信号加入噪声后进行成像,之后再经滤波重构全矩阵数据进行成像,成像结果如图 11 所示。由图可知,加入噪声后图像产生一定的影响,使用中值滤波处理后进行成像的图像分辨率进一步提高,基本可以实现缺陷可视化。

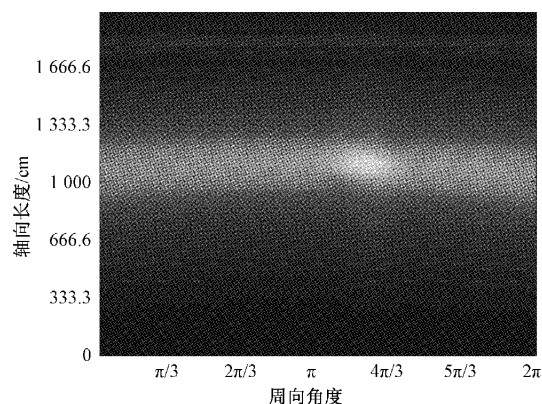
利用希尔伯特变换,再将变换后的信号进行锐化处理,重构锐化信号的全矩阵数据,利用相应的全矩阵算法进行成像,成像结果如图 12 所示。

对比未经处理的信号成像结果可以发现,经过信号锐化处理之后再成像可以大幅提高缺陷成像分辨率。未经中值滤波处理的图像中,聚焦效果尚可,但与经滤波和锐化以后的图像相比较,信噪比影响严重。各信号成像像素对比如表 1 所示。

由表 1 可以看出,原始仿真信号由于没有噪声干扰,缺陷成像区域像素为 11,效果较好,加入噪声干扰,更接近于



(a) 原始信号加入噪声成像



(b) 中值滤波处理后的成像

图 11 TFM 缺陷成像

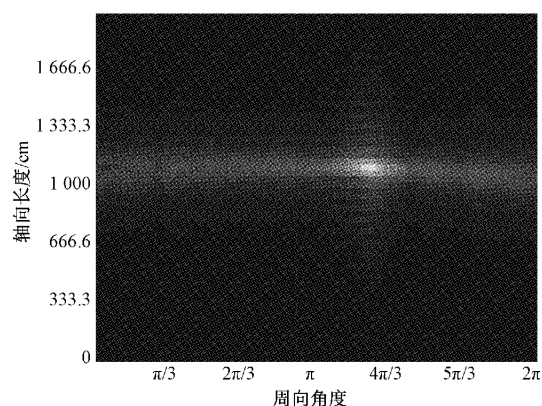


图 12 包络锐化处理后的 TFM 成像

表 1 各信号成像像素对比

信号处理方式	缺陷成像区域像素
原始仿真信号	11
加入噪声信号	20
中值滤波信号	13
包络锐化处理	3

真实环境影响,使得成像区域像素值变为 20,噪声干扰影响严重,成像效果削弱 81.8%,经过中值滤波再次成像,像

素值变为 13,较噪声信号成像效果提高 35%,但仍然比原始仿真信号削弱 18.2%,在经过包络锐化处理,成像效果较中值滤波提高 76.9%,较原始信号成像效果提高 72.7%,精度明显提高。

经过对信号的有效处理,可以验证信号处理有效提高 TFM 成像精度,实现管道缺陷高精度成像。并且本文的 TFM 成像算法较 SAFT 算法具有更好的缺陷聚焦成像效果,获取的信号多于 SAFT 算法,可以更好的反应缺陷情况。但是本文的 TFM 算法也存在一定的不足,成像速度较慢,未来需要改进算法,实现快速成像。

## 5 结 论

本文采用 ABAQUS 仿真管道缺陷,并利用 TFM 算法对管道缺陷实现成像。将采集的超声导波信号通过中值滤波、希尔伯特变换以及信号锐化处理,最后实现管道缺陷的成像,可以将管道缺陷以图像的形式呈现出来,提高了缺陷成像的分辨率和信噪比,为后续的管道缺陷辨识及量化评价奠定了基础。

## 参 考 文 献

- [1] 靳世久,杨晓霞,陈世利,等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 925-934.
- [2] NANEKA R P, JOTHILAKSHMI N, JAYAKUMA R T. Ultrasonic phased array examination of circumferential weld joint in reactor pressure vessel of BWR [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 265: 366-374.
- [3] 王常玺,刚铁,于朋,等. 一种铝合金薄板搅拌摩擦焊缝的超声快速检测方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(2): 7-13.
- [4] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Effects of array transducer inconsistencies on total focusing method imaging performance[J]. NDT E Int. 2011, 44(4): 361-368.
- [5] 池强强,胡明慧. 相控阵超声全聚焦成像算法的有限元仿真研究[J]. 声学技术, 2020, 39(2): 176-183.
- [6] 马立印,李洋,周正干. 检测发动机叶片的相控阵超声换能器设计[J]. 压电与声光, 2017, 39(5): 669-672.
- [7] 马立印,李洋,周正干. 整体叶盘叶片焊缝裂纹相控阵超声检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(9): 1900-1908.
- [8] 陈汉新,向波,周庆,等. 超声相控阵有限元建模分析[J]. 焊接技术, 2018, 47(1): 15-17.
- [9] SAMPATH S, DHAYALAN R, KUMAR A, et al. Evaluation of material degradation using phased array ultrasonic technique with full matrix capture [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 120, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.105118.
- [10] 沙正骁,刘元钰,梁菁,等. 微小缺陷回波信号的成像方法研究[J]. 压电与声光, 2021, 43(5): 640-645.
- [11] 艾诗迪,隋欣,金汉,等. 基于 Lamb 波的改进概率法多层结构脱粘成像方法[J]. 压电与声光, 2021, 43(4): 455-460.
- [12] 陈尧,冒秋琴,陈果,等. 基于 Omega-K 算法的快速全聚焦超声成像研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 128-134.
- [13] CHEN Y, LUO Z B, ZHOU Q, et al. Modeling of ultrasonic propagation in heavy-walled centrifugally cast austenitic Stainless steel based on EBSD analysis [J]. Ultrasonics, 2015, 59: 31-39.
- [14] WESTON M, NAGESWARAN C, SUTCLIFFE M, et al. Calibration of ultrasonic techniques using full matrix capture data for industrial inspection [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2012, 54(11): 602-611.

## 作者简介

李靖, 硕士, 主要从事管道缺陷超声导波检测方面的研究。

E-mail: 1321650316@qq.com

李忠虎(通信作者), 硕士, 教授, 主要从事无损检测和机电设备故障诊断方面的研究。

E-mail: lizhonghu@imust.edu.cn