

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107804

基于频率-波数的频域合成孔径导波成像研究*

龙盛蓉^{1,2}, 邓文武², 陈炫宇², 韩壮禄², 李志农²

(1. 南昌航空大学 江西省图像处理与模式识别重点实验室 南昌 330063;
2. 南昌航空大学 无损检测教育部重点实验室 南昌 330063)

摘要:为实现管道中缺陷位置与尺寸的准确预测,在爆炸反射成像原理的基础上,提出了一种基于频率-波数的频域合成孔径导波成像算法。通过磁致伸缩方式在管道中激励出 $T(0,1)$ 模式导波,对采集到的回波信号做二维傅里叶变换并进行角谱运算对频域内声场进行重构。最后,对其进行反傅里叶变换后实现目标区域内的聚焦成像。通过实验验证成像结果,同时与原始B扫结果进行了对比。结果表明,所提算法有效抑制了旁瓣效应产生,使成像分辨率提高了约30%,定量误差缩减了26.1%;同时研究表明在缺陷轴向位置、深度及倾斜角度发生改变时,利用该算法实现缺陷图像重构后,其检测准确度只受缺陷周向范围的绝对尺寸影响,对周向表面缺陷检测具体较高的灵敏度。

关键词:管道;超声导波;频率-波数;频域合成孔径;成像算法

中图分类号: TG115.28 TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on frequency domain synthetic aperture guided wave imaging based on frequency-wavenumber

Long Shengrong^{1,2}, Deng Wenwu², Chen Xuanyu², Han Zhuanglu², Li Zhinong²

(1. Key Laboratory of Jiangxi Province for Image Processing & Pattern Recognition, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Key Laboratory of Nondestructive Testing of the Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: To accurately predict the location and size of defects in the pipeline, a synthetic aperture guided wave imaging algorithm based on frequency wavenumber domain is proposed. And the principle of explosive reflection imaging is also utilized. The $T(0,1)$ mode guided wave is excited in the pipeline by magnetostriction. The collected echo signal is subjected to two-dimensional Fourier transform and angular spectrum operation to reconstruct the sound field in the frequency domain. Finally, the focus imaging in the target area is realized by using the inverse Fourier transform. The imaging results are verified by experiments and compared with the original B-scan results. Results show that the side lobe effect is effectively controlled by the proposed algorithm. The imaging resolution is improved about 30% and the quantitative error is reduced by 26.1%. The affection of the axial position, the depth and the inclination angle of defects are also studied. By using the algorithm to reconstruct the defect image, the detection accuracy is only affected by the absolute size of the circumferential defects and the detection of circumferential surface defects has a high sensitivity.

Keywords: pipeline; ultrasonic guided wave; frequency-wavenumber; frequency domain synthetic aperture; imaging algorithm

0 引言

管道结构在各个领域中应用广泛,由管道破损带来

的经济损失也不容忽视,因此亟需一种便捷且准确的方法实现其定期检测甚至长期健康监测,以保障管道的正常运行^[1-3]。超声导波检测因能实现对管道的快速扫查成为管道无损检测领域研究的热点^[4-6],但由于导波具有

收稿日期:2021-04-22 Received Date: 2021-04-22

* 基金项目:国家自然科学基金(52075236)、装备预研基金(6142003190210)、江西省教育厅项目(GJJ180525)、江西省图像处理与模式识别重点实验室开放基金(ET202008414)项目资助

多模态与频散特性^[7],使得其信号处理非常复杂且困难,难以保证足够的精度来评估管道的损坏程度及缺陷的具体尺寸。近年来,随着数字信息处理技术的不断发展,学者们针对此问题提出了一系列算法对管道超声检测的灵敏度进行改善。Ditri^[8]以 S 参数形式研究了周向裂纹的散射波,并提出了修正裂纹尺寸的可能性。Ing 等^[9]在模态提取技术的基础上,提出时间反转技术,实现了任意时间点波形的预测。Hayashi 等^[10]在对管道导波进行模态提取后,利用时间反转算法实现了管道导波成像,并证明在较高的频率下,该算法对纵向和周向裂纹的检测灵敏度都较高。上述信号处理技术都是基于时域的,仍不能完全消除导波频散与多模态特性带来的影响,使得成像效果不佳。研究表明,在频域中对信号进行处理,能够有效地减少相干噪声带来的影响。Wilcox 等^[11]使用 EMAT 激励兰姆波(S_0)后应用合成聚焦进行后处理,并使用该系统成功的实现了大型金属板的检测。Sun 等^[12]提出了频域合成孔径算法,大大提高了计算速度。王冠等^[13]提出了一种通过对原始信号预处理提高频域合成孔径超声阵列成像质量的方法;冒秋琴等^[14]提出了一种基于相位环形矢量的频域合成孔径聚焦成像算法;Davies 等^[15]对比了板中的三种合成聚焦算法,并通过对比与分析,证明了频域合成孔径成像算法具有高的分辨率;René 等^[16]针对导波的频散特性进行补偿,对板中频域合成孔径算法进行了改进,通过对比试验证明了其有效性。

以上合成孔径聚焦成像的工作实现了板中缺陷的定量分析,然而由于管道结构的特殊性,目前利用导波检测技术难以保证足够的检测精度。因此本文提出了一种基于频率-波数的频域合成孔径管道超声导波成像算法。该方法可在不增加硬件设备的条件下,采用共源法的激励方式实现对管道缺陷的精确定位与定量分析,同时在爆炸反射成像原理的基础上,结合频率-波数偏移理论,对声源发出的 $T(0,1)$ 波信号进行回传成像,并验证了该算法对缺陷定位定量的有效性与准确度。

1 基于频率-波数的频域合成孔径成像理论

1.1 频率-波数法

导波传播过程中遇到缺陷时会发生模态转换,引起缺陷处声场发生变化。角谱法^[17]通过换能器接收到的信号,对声场进行重建,从而得到缺陷的位置信息。

试件一端均匀布置 N 个传感器,将试件一端均匀分成 $N+1$ 份,用 x 表示传感器的位置,其中 1 号传感器 $x=0$,以此类推,每个传感器代表不同的角度。每个传感器接收到的信号记为 $u(x, z=0, t)$,其中 z 为距离试件端面的距离, t 为传播时间。将接收到的信号经过二维傅里叶变换后即可得到角谱为:

$$U(\omega, k_x, z=0) = \iint_{-\infty}^{\infty} u(x, z=0, t) e^{(-jk_x x)} e^{(-j\omega t)} dx dt \quad (1)$$

式(1)表示试件端面处 $z=0$ 的角谱,试件任意位置处的角谱可通过式(2)计算得出。

$$U(\omega, k_x, z_i) = \begin{cases} u(\omega, k_x, z_{i-1}) e^{-i\sqrt{k^2 - k_x^2} \Delta z}, & k^2 - k_x^2 > 0 \\ 0, & k^2 - k_x^2 < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, Δz 是传播的步长, k_x 是波矢在 x 方向的分量, ω 是角频率,波矢 $k = \omega/c$, c 为导波的群速度。

基于爆炸反射模型如图 1 所示,将散射体看作一个声源,被深度 Z 处的探头阵列所接收,若在平面上摆放若干个等间距排列的接收阵元,并记录下该深度 $Z_i (i=1, 2 \dots N)$ 处的回波声场;然后根据爆炸反射原理,将该回波声场沿着各个深度偏移,得到布标区域的聚焦图像。由阵列探头进行接收信号并进行成像,该成像过程可以简化为位于散射体正上方的换能器在 $t=0$ 时刻接收到的散射体辐射的超声波信号并生成图像。根据爆炸反射模型,超声阵列发出的超声波经由散射体反射后被阵列重新接收的过程,可以视为由散射体发出的超声波被阵列接收。因此,声速不再是 c 而是 $c/2$ 。

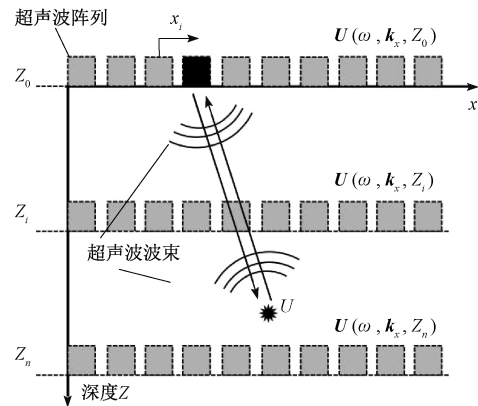


图 1 爆炸反射模型

Fig. 1 Explosion reflection model

利用二维反傅里叶变换推导出频域波动方程的一般解 $U(\omega, k_x, z_i)$, 表达式为:

$$U(\omega, k_x, z_i) = U(\omega, k_x, z_{i-1}) \alpha_c(k_x, \Delta z, \omega, \hat{c}) \quad (3)$$

其中, $U(\omega, k_x, z)$ 表示 $U(t, x, z)$ 经过傅里叶变换至频域的声场。 $\alpha(\cdot)$ 表示波场外推算子, 即:

$$\alpha_c(k_x, \Delta z, \omega, \hat{c}) = e^{jk_z(z_i - z_{i-1})} \quad (4)$$

其中, Δz 是传播的步长。 k_z 是波矢在 z 方向的分量, k_z 的表达式为:

$$k_z(k_x, \omega) = -\text{sign}(\omega) \sqrt{\frac{\omega^2}{\hat{c}^2} - k_x^2}, \frac{\omega^2}{\hat{c}^2} \geq k_x^2 \quad (5)$$

其中, $\text{sign}(\cdot)$ 是一个符号函数, $\hat{c}$ 是实际速度 c 的一半。结合式(3) ~ (5), 在 $t = 0$ 时刻将记录的波场沿离散 Z 轴逐片进行延拓直至整个目标区域即可获得预期的聚焦图像, 即:

$$I(\mathbf{x}, z_i) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(\omega, \mathbf{k}_x, z_i) \cdot e^{ik_z \Delta z} \cdot e^{ik_x x} \cdot d\mathbf{k}_x d\omega \quad (6)$$

1.2 管道频域合成孔径成像算法

注意上述爆炸反射模型通常适用于体波, 对于管道中导波需要做一些改进。由于管道是个均匀结构, 因此沿管道中轴线将管道展开铺平, 如图2所示。由磁致伸缩传感器激励导波信号, 经过爆炸点反射, 被阵列式传感器接收, 结合上述爆炸反射模型, 将这一过程看作由爆炸点发出的信号被阵列接收, 然后将接收信号延拓到另一个位置上, 将各个位置处的接收声场在 $t = 0$ 时刻进行聚焦, 得到爆炸点的位置信息, 如图3所示。

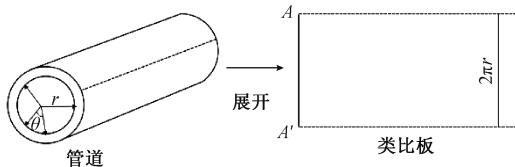


图2 显示管道和展开管道类比

Fig. 2 The pipe and unrolled pipe analogy

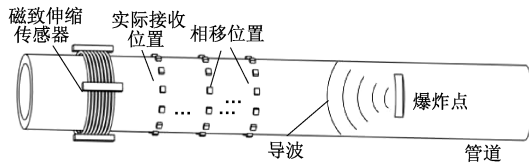


图3 频域内声场外推图

Fig. 3 Acoustic field extrapolation in frequency domain

因此式(2)可重新写成:

$$U(n, z_i, \omega) = U(n, z_{i-1}, \omega) \exp(ik_z \Delta z) \quad (7)$$

其中,

$$k_z(n, \omega) = -\text{sign}(\omega) \sqrt{\frac{\omega^2}{\hat{c}^2} - \frac{n^2}{r^2}}, \frac{\omega^2}{\hat{c}^2} \geq \frac{n^2}{r^2} \quad (8)$$

其中, n 表示周向族, r 是管道外径。当激励出 $T(0,1)$ 模态导波, 反射回来的波形中包 $T(0,1)$, $F(1,2), \dots, F(n,2)$, 因此对于 $T(0,1)$ 模态的相位偏移轴对称模态的阶数为 $n = 0$, 将式(7)、(8)代入式(6)中即可获得管道内的聚焦图像 $I_c(\theta, z_i)$, θ 表示管道圆周角, 表达式如下:

$$I_c(\theta, z_i) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(n, z_i, \omega) e^{ik_z \Delta z} e^{-in\theta} d\theta d\omega \quad (9)$$

2 管道导波检测信号提取

2.1 实验装置

根据频率-波数的频域合成孔径管道导波成像算法对检测数据的要求, 本实验利用了磁致伸缩导波检测实验平台, 平台由计算机、信号发生器 (SIGLENT SDG 1032X)、功率放大器 (N4L LPA05 power amplifier)、信号采集卡 (NI PXI6259) 及信号放大器 (PAI preamplifier) 5部分组成如图4所示。信号激励端由镍片及多匝环形线圈组成, 基于磁致伸缩效应, 通过周向磁化镍片产生的偏置磁场与线圈产生的交变磁场共同作用在管道中激励出 $T(0,1)$ 模态导波; 接收端采用自制的磁致伸缩换能器, 与激励传感器不同, 接收端由永磁体和曲折线圈组成, 如图5所示。由信号发生器产生特定频率, 经 Hanning 窗调制的 5 个周期的余弦信号经由功率放大器作用于管道一端的传感器上; 磁致伸缩导波的端面回波、缺陷回波经过阵列传感器, 被信号采集卡、信号放大器所接收; 通过计算机完成对接收信号的处理, 实现缺陷的成像。

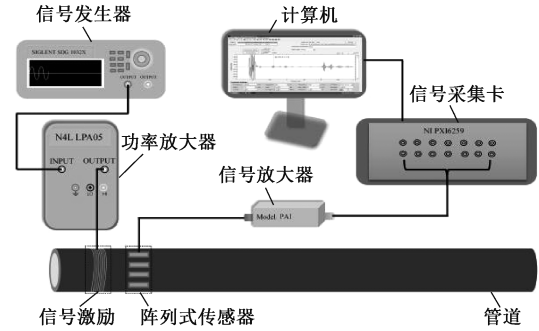


图4 实验装置原理

Fig. 4 Principle of the experimental device

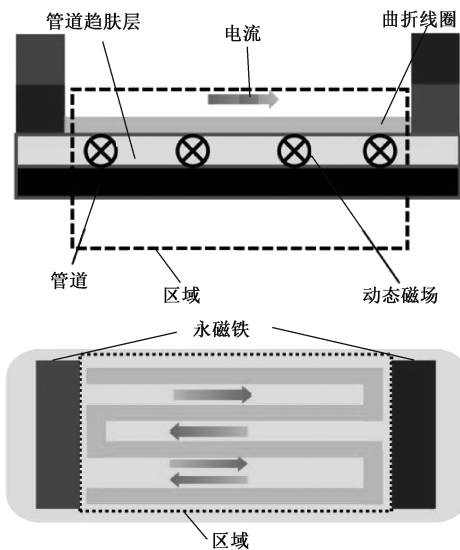


图5 接收传感器结构展开图

Fig. 5 Structure expansion of the receiving sensor

如表 1 所示,通过该管道参数计算了导波在管中的频散曲线,中心频率依照 disperse 频散曲线分布选择,选择采用中心频率 75 kHz,周期为 5,占空比为 50% 的脉冲调制信号作为激励信号,采样频率为 1 MHz。

表 1 待测管道参数

Table 1 Pipeline parameters to be measured

参数	数值
管道长度/mm	1 200
外径/mm	273
壁厚/mm	8
弹性模量 $E/(\text{KN}/\text{mm}^2)$	200
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 850
泊松比	0.3

检测对象为长为 1 200 mm 的管道,在距离管道端面 600 mm 处利用线切割技术加工出一个轴向宽度为 2 mm、周向范围为 85.8 mm、深度为 4 mm 的槽型缺陷,如图 6 所示。

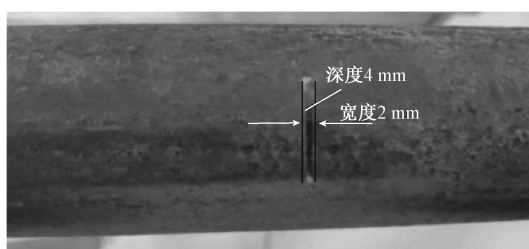


图 6 管道中缺陷的信息

Fig. 6 Defect information in the pipeline

2.2 数据采集

磁致伸缩接收换能器采用阵列式布置,即将换能器沿管道同一圆周上,按间隔 18° 进行放置,即将管道周向平均划分为 20 等分处放置。通过这种放置方式实现了导波检测信号沿管道周向逐点接收。为了便于说明,将管道沿某条母线展开,接收换能器与缺陷相对位置示意图如图 7 所示。

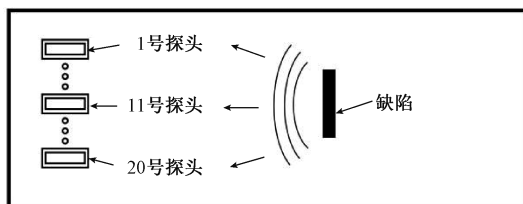


图 7 接收传感器与缺陷相对位置

Fig. 7 Relative position of receiving sensor and defect

3 基于频率-波数的频域合成孔径成像算法结果分析

利用上节的实验装置对目标管道进行检测,阵列式传感器接收位置如图 7 所示。其中 11 号接收点正对于缺陷处,而 20 号接收传感器与缺陷存在一定角度,它们的时域波形显示在图 8 中。分析图 8 发现,11 号探头接收到的缺陷回波信号幅值明显高于 20 号探头的缺陷回波幅值,同时由于探头与缺陷的相对位置,端面回波也存在一定的差异。由于缺陷存在位置的不确定性,接收传感器与缺陷之间角度差的现象确定存在,该情况会造成接收信号的缺陷幅值存在较大的区别,从而造成对管道上缺陷定量的不准确。

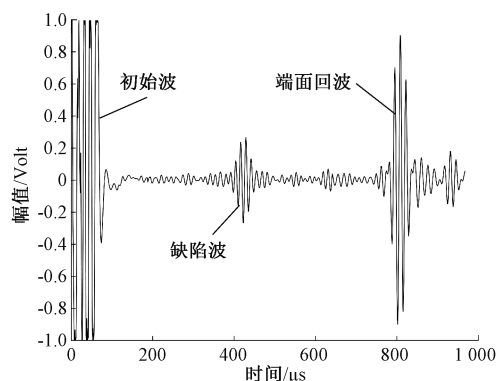
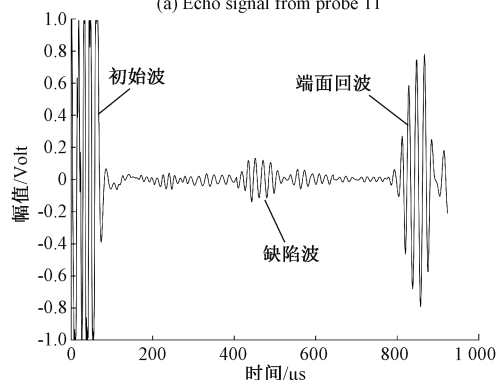
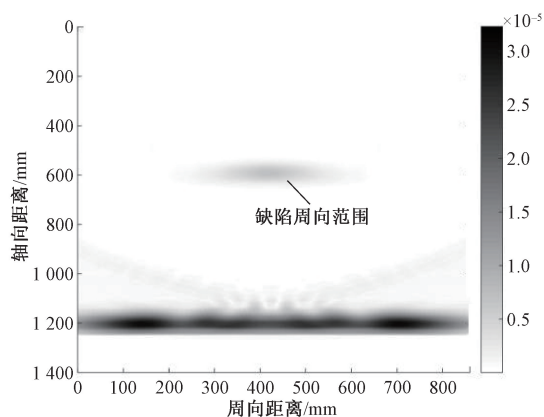
(a) 11号探头位置所接收的回波信号
(a) Echo signal from probe 11(b) 20号探头位置所接收的回波信号
(b) Echo signal from probe 20

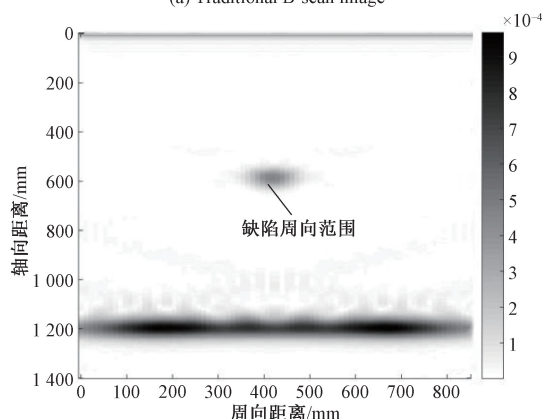
图 8 传感器接收的时域信号图

Fig. 8 Time domain signal received by sensor

为了解决由于接收探头与缺陷位置之间的差距造成对检测缺陷定量的不准确性,本文提出了基于频率-波数的频域合成孔径的管道成像算法对缺陷进行定量分析,同时采用传统 B 扫成像技术对该检测信号进行了 B 扫成像,如图 9 所示。对比成像结果,两种方式均可以对缺陷进行定位,但成像效果存在一定的差异。



(a) 传统B扫成像图
(a) Traditional B-scan image



(b) 基于频率-波数的频域合成孔径成像图
(b) Frequency domain synthetic aperture imaging based on frequency wavenumber

图9 传统B扫与频域SAFT对比图

Fig. 9 Comparison of the traditional B-scan and SAFT in frequency domain

由图9(a) B扫成像图可知,其成像结果难以呈现出缺陷的原有信息,因为传感器激励出超声波的能量主要集中于声轴为中心的某一角度范围内,但是在主声束角度范围以外还存在一些能量很低的、只分布于声源附近的副瓣声束。这也导致原始图像中缺陷信息边缘模糊不清。但经过频率-波数算法处理后的图像如图9(b)所示,缺陷中心处回波能量更集中,缺陷的水平宽度变窄,由此可见,说明频域SAFT成像技术具有显著的改善图像分辨率的能力。

从图9(a)与(b)中分别提取缺陷中心处幅值最大时域信号并进行归一化幅值处理,图10是经过频域SAFT算法处理前后的归一化幅值对比图。纵坐标表示经过归一化处理后的幅值,根据超声质量评价标准中横向分辨率的定义,采用-6 dB定量法,用缺陷回波的半波高横向水平宽度近似估算图像的横向分辨率,将幅值降低到1/2,即0.5对应的两个横坐标,差值就是量值,即为缺陷的周向长度。

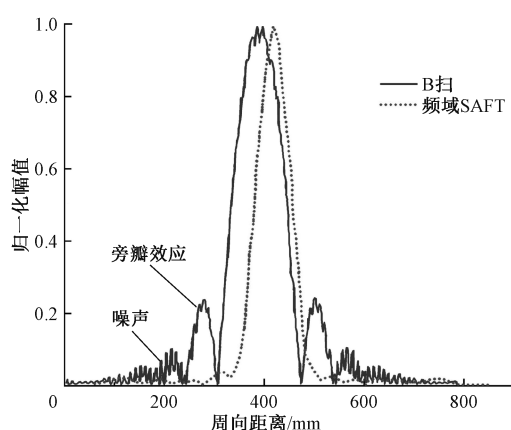


图10 B扫与频域SAFT归一化幅值对比图

Fig. 10 Comparison of normalized amplitude of B scan and SAFT in frequency domain

本次实验中缺陷的实际大小为85.8 mm,由图10可知,B扫图像中缺陷的半波高横向水平宽度为111 mm,经过频率-波数算法处理后,频域SAFT聚焦半波高横向水平宽度减小至82 mm,B扫缺陷尺寸与实际缺陷周向大小(85.8 mm)误差为29.3%,而频域SAFT测量误差为4.4%。同时,对比两者,处理后的半波高横向水平宽度大致缩小为原来的73.8%,即成像分辨率提高了约30%,定量误差缩减了26.1%,并且从图像中可知,频域SAFT去除了噪声,并且抑制了旁瓣效应产生,因此频域SAFT聚焦算法比传统B扫成像对缺陷的定量更加精确,成像分辨率也得到了改善,且该优异性在不同缺陷深度下仍然存在。

4 基于频率-波数的频域合成孔径成像算法适应性分析

4.1 缺陷相对位置对成像检测的影响

为了研究基于频率-波数的频域合成孔径成像算法对于不同位置处缺陷的检测灵敏度,本次实验选择六根长度分别为0.6、0.9、1.2、1.5、1.8和2.1 m的管道,在管道的中心处均预置有宽度为2 mm,深度为4 mm,周向长度为 1.95λ (λ 为检测波的波长)的缺陷。利用图4仪器对以上管道进行检测并提取检测信号进行频率-波数的频域合成孔径成像,缺陷重构图像情况如图11所示。对所得6组实验数据按入射信号的最大值归一化处理,得出其预测轴向位置、预测深度及预测周向范围,如表2所示。

由图11和表2可知,对于检测所得的轴向位置,当管道长度为0.6 m和0.9 m时,由于超声导波的传播距离过短(分别为0.3 m及0.45 m),各个模式的导波并

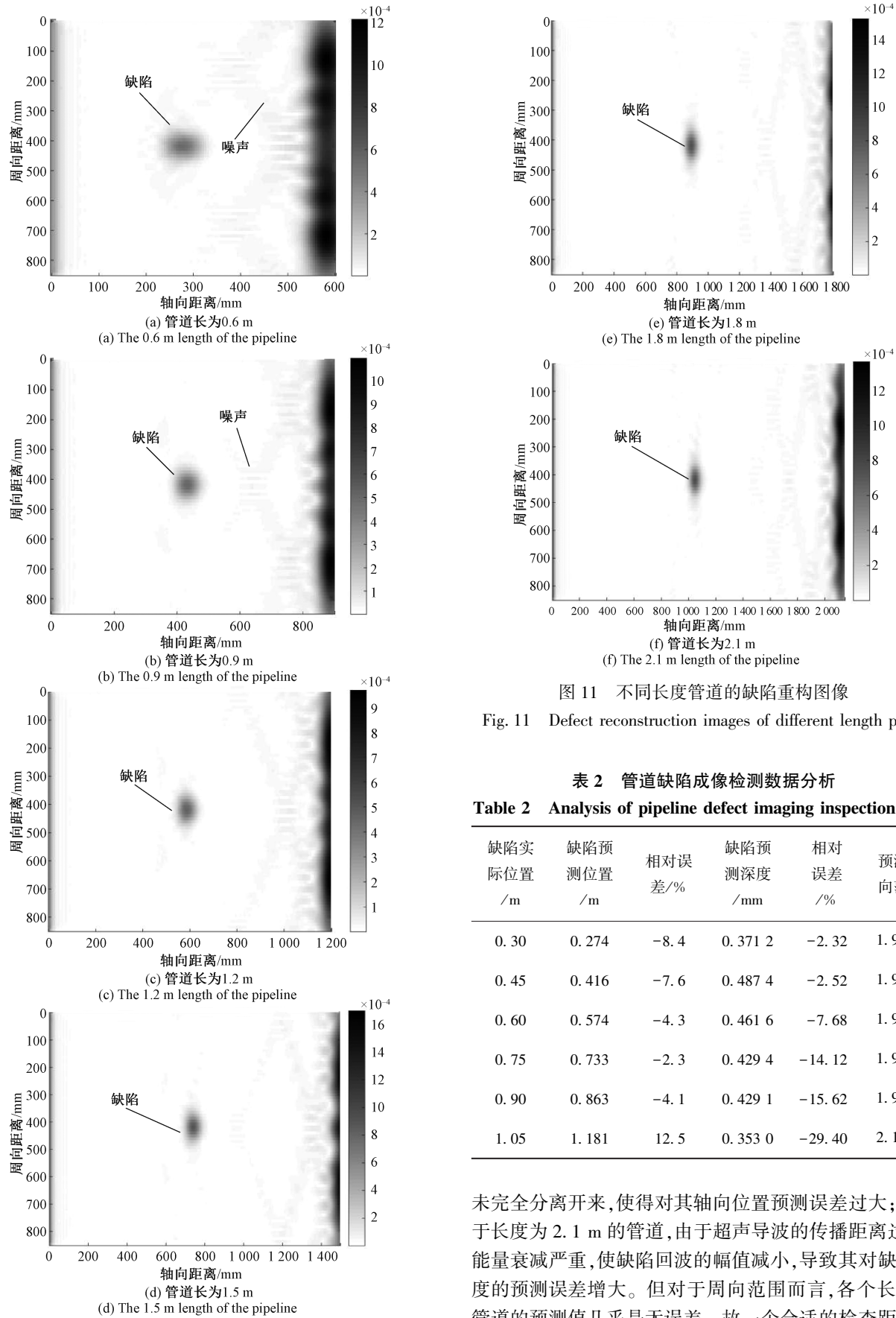


图 11 不同长度管道的缺陷重构图像
Fig. 11 Defect reconstruction images of different length pipes

表 2 管道缺陷成像检测数据分析
Table 2 Analysis of pipeline defect imaging inspection data

缺陷实际位置 /m	缺陷预测位置 /m	相对误差/%	缺陷预测深度 /mm	相对误差/%	预测周向范围
0.30	0.274	-8.4	0.371 2	-2.32	$1.95\lambda_s$
0.45	0.416	-7.6	0.487 4	-2.52	$1.95\lambda_s$
0.60	0.574	-4.3	0.461 6	-7.68	$1.95\lambda_s$
0.75	0.733	-2.3	0.429 4	-14.12	$1.95\lambda_s$
0.90	0.863	-4.1	0.429 1	-15.62	$1.95\lambda_s$
1.05	1.181	12.5	0.353 0	-29.40	$2.19\lambda_s$

未完全分离开来,使得对其轴向位置预测误差过大;而对于长度为 2.1 m 的管道,由于超声导波的传播距离过长,能量衰减严重,使缺陷回波的幅值减小,导致其对缺陷深度的预测误差增大。但对于周向范围而言,各个长度的管道的预测值几乎是无误差。故一个合适的检查距离对

于提高检测结果的准确性也是非常重要的,距离过短会有过多的噪声,距离过长能量衰减严重导致缺陷处的 $T(0,1)$ 模态导波无法完全相干求和,使得重构后图形的缺陷面积过大。由分析可知,在合适的检测范围之内,系统的检查灵敏度几乎是无差别。

4.2 缺陷深度对成像检测的影响

在实际检测过程中,裂纹又分为表面裂纹与通透裂纹等类型。为了探究该算法对不同深度裂纹的检测灵敏度是否存在差异,分别在长度为1200 mm,外径为273 mm,壁厚为8 mm的管道上预置了深度为 $H/4$ 、 $H/2$ 、 $3H/4$ 及 H (H 为壁厚),轴向宽度为2 mm,周向范围为 $1.95\lambda_s$ 的4个周向裂纹类缺陷,缺陷深度示意图如图12所示。将所得实验数据归一化处理,得出4个缺陷的周向轮廓的幅值分布,如图13所示。

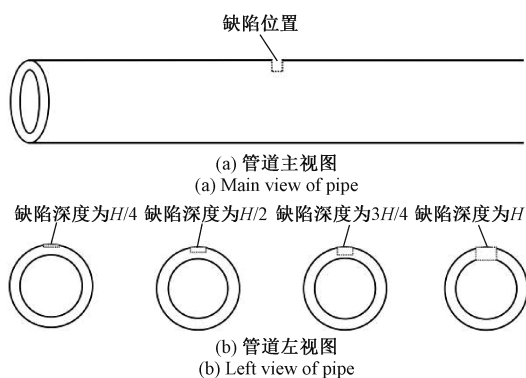


图12 缺陷示意分布图

Fig. 12 Schematic distribution of defects

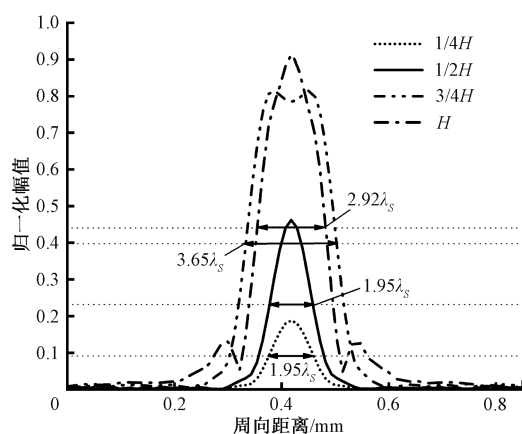


图13 缺陷轮廓幅值分布

Fig. 13 Distribution of defect contour amplitude

由分析可得,对于深度为 $H/4$ 及 $H/2$ 的缺陷,两者对于周向范围的预测是准确的,缺陷是周向范围均为

$1.95\lambda_s$,与实际管道中的缺陷周向范围($1.95\lambda_s$)相符,当缺陷深度为 $3H/4$ 和 H 时,缺陷的周向范围预测误差较大;因此当缺陷深度占壁厚的比例较小时,其对缺陷深度的预测较为准确;当管道中缺陷深度较大,或者是贯穿型缺陷时,该算法对周向范围的预测误差也较大。即该算法检测管道表面缺陷时具有较高的精准度,能够准确的对缺陷的周向范围进行定量。

4.3 裂纹倾斜角度对成像检测的影响

本文所研究的检测对象为周向裂纹类缺陷,但在实际情况中裂纹不可能严格地与管道轴线方向垂直,为了探究裂纹的倾斜角度对检测结果的影响程度,分别在4根长为1.2 m,外径为273 mm,壁厚为8 mm的管道中央预置了深度为4 mm,轴向宽度为4 mm,周向范围为80 mm,倾角分别为 5° 、 10° 、 15° 与 40° 的槽型缺陷,如图14所示。

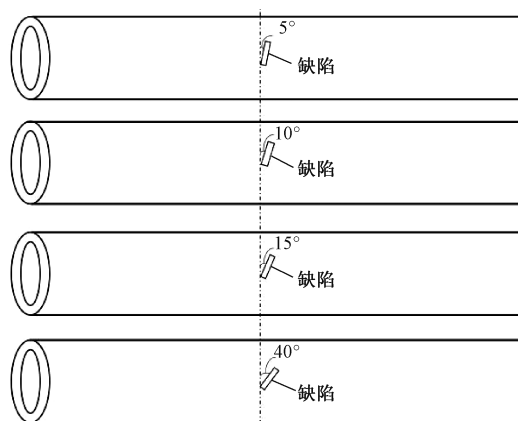


图14 缺陷倾斜角分布情况

Fig. 14 Distribution of defect inclination angle

基于频率-波数的频域合成孔径成像算法,将采集不同角度的缺陷信号进行图像重构,如图15所示。在裂纹倾角为 10° 的管道缺陷重构图像中存在些许的噪声但仍能从中读取缺陷的相关信号;缺陷的倾角越大,其缺陷重构图像中存在的噪声也越多,至 15° 时还隐约可以分辨出缺陷的位置,伪缺陷已逐渐模糊不清,40°时伪缺陷信息已经完全消失,但是也无法分辨缺陷的具体位置及其他信息。故可得出结论:裂纹的倾角越大,对缺陷的定量分析误差较大,当缺陷的裂纹倾角较小时,仍可使用本文所提出的算法进行成像检测,对缺陷进行评判,当倾角过大时,其缺陷重构图像中缺陷的位置、深度及周向范围等信息较模糊,因此该算法对于管道中的周向缺陷具有较好的识别作用。

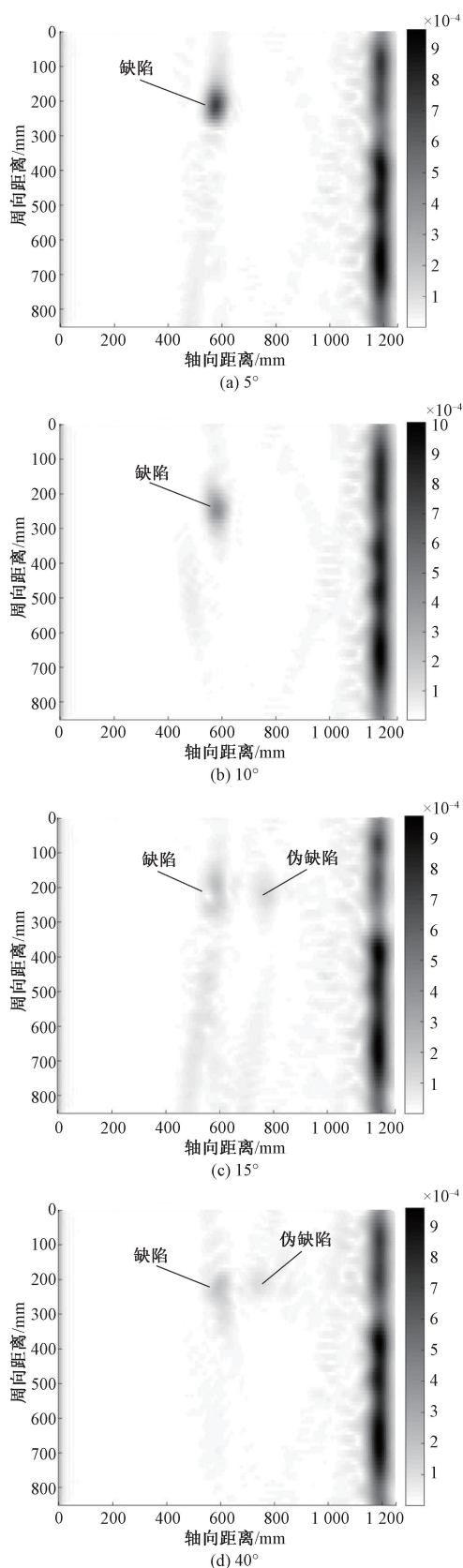


图 15 缺陷倾斜角重构图

Fig. 15 Reconstruction of defect inclination angle

5 结 论

为解决超声检测对于管道检测中无法直观反映缺陷信息的情况,本文基于爆炸反射成像原理的基础上,结合频率-波数偏移理论,提出了基于频率-波数的频域合成孔径管道导波成像算法;搭建了管道超声导波检测成像系统,采用共源式的方式激励信号。根据所设计的成像算法对获得的数据进行缺陷图像重构并与传统的 B 扫成像方法进行对比,结果表明,该算法成像结果不仅能够对缺陷位置进行准确定位,还可以对缺陷进行定量,证明了所提出的算法的有效性。通过改变缺陷所在的轴向位置、缺陷的深度与缺陷的倾斜角度等参数,验证了基于频率-波数的频域合成孔径管道导波成像算法对周向缺陷类裂纹检测结果的稳定性。通过该算法对缺陷图像进行重构,发现其准确度只与缺陷周向范围的绝对尺寸有关,受缺陷轴向位置影响较小,对表面缺陷的检测灵敏度相较于通透类缺陷更高;同时,受缺陷倾斜角的影响,该成像算法更适合于周向缺陷的检测。

在工业中,在役管道缺陷存在的种类繁多,因此造成导波传播过程复杂,导波在经过倾斜角较大的缺陷时能量衰减以及模态转换的现象将更为严重,并且传播的过程中产生的噪声与信号的分离也将影响导波检测成像结果的准确性。在未来,将进一步研究如何在成像中解决上述问题影响。

参考文献

- [1] 刘志萌. 水下油管泄漏时油滴尺寸分布研究[D]. 厦门:集美大学, 2017.
LIU ZH M. Study on the size distribution of oil droplets in underwater tubing leakage [D]. Xiamen: Jimei University, 2017.
- [2] SICARD R, CHAHBAZ A, GOYETTE J. Guided Lamb waves and L-SAFT processing technique for enhanced detection and imaging of corrosion defects in plates with small depth-to wavelength ratio[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2004, 51(10): 1287-1297.
- [3] ROSE J L, DITRI J, PILARSKI A, et al. A guided wave inspection technique for nuclear steam generator tubing[J]. Ndt & E International, 1994, 27(6): 307-310.
- [4] ALLEYNE D N, PAVLAKOVIC B, LOWE M J S, et al. Rapid, long range inspection of chemical plant pipework using guided waves[J]. Key Engineering Materials, 2004, 270-273(1): 434-441.
- [5] LOWE M J S, ALLEYNE D N, CAWLEY P. The mode conversion of a guided wave by a part-circumferential

- notch in a pipe [J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, 65(3): 649-656.
- [6] DEMMA A, CAWLEY P, LOWE M, et al. The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 114(2): 611-625.
- [7] 张红川. 弯管中超声导波的模态分析及其缺陷检测[D]. 天津:河北工业大学, 2015.
- ZHANG H CH. Modal analysis and defect detection of ultrasonic guided waves in elbows [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [8] DITRI J. Utilization of guided elastic waves for the characterization of circumferential cracks in hollow cylinders [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 96(6): 3769-3775.
- [9] ING R K, FINK M. Time-reversed Lamb waves [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(4): 1032-1043.
- [10] HAYASHI T, MURASE M. Defect imaging with guided waves in a pipe [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 117(4): 2134-2140.
- [11] WILCOX P D. Omni-directional guided wave transducer arrays for the rapid inspection of large areas of plate structures [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50(6): 699-709.
- [12] SUN Z, ZHANG L, ROSE J L. Flexural torsional guided wave mechanics and focusing in pipe [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127(4): 471-478.
- [13] 王冠, 黄丽霞, 王志刚, 等. 提高频域合成孔径超声阵列成像质量的方法 [J]. 传感技术学报, 2020, 33(9): 1285-1291.
- WANG G, HUANG L X, WANG ZH G, et al. A method for improving the imaging quality of synthetic aperture ultrasonic array in frequency domain [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33(9): 1285-1291.
- [14] 冒秋琴, 陈尧, 石文泽, 等. 频域相位相干合成孔径聚焦超声成像研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 135-145.
- MAO Q Q, CHEN Y, SHI W Z, et al. Research on synthetic aperture focusing ultrasonic imaging based on phase coherence in frequency domain [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 135-145.
- [15] DAVIES J, SIMONETTI F, LOWE M J, et al. Review of synthetically focused guided wave imaging techniques with application to defect sizing [J]. Quantitative Nondestructive Evaluation, 2006, 820(1): 142-149.
- [16] RENÉ S, GOYETTE J, ZELLOUF D. A SAFT algorithm for lamb wave imaging of isotropic plate-like structures [J]. Ultrasonics, 2002, 39(7): 487-494.
- [17] 姜银方, 陈凯歌, 蒋俊俊, 等. 基于角谱法的管道导波成像检测研究 [J]. 电子科技, 2017, 30(12): 83-85, 101.
- JIANG Y F, CHEN K G, JIANG J J, et al. Research on pipe guided wave imaging detection based on angular spectrum [J]. Electronic Science and Technology, 2017, 30(12): 83-85, 101.

作者简介



龙盛蓉 (通信作者), 2001 年于湖北工业大学获得学士学位, 2005 年于湖北工业大学获得硕士学位, 2014 年于南昌大学获得博士学位, 现为南昌航空大学讲师, 主要研究方向为超声无损检测。

E-mail: lornalong@126.com

Long Shengrong (Corresponding author) received her B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Hubei University of Technology in 2001 and 2005, and received her Ph. D. degree from Nanchang university in 2014. She is currently a lecture at Nanchang Hangkong University. Her main research interest is ultrasonic nondestructive testing.