

基于阵列增强的管道缺陷导波检测方法研究*

刘迪, 鲍 峤, 胡伟伟, 王 强
(南京邮电大学自动化学院、人工智能学院 南京, 210023)

摘要 管道在服役过程中因压力、温度及介质腐蚀的影响容易发生管体缺陷,且管道初期缺陷尺寸小,通过超声导波进行直接检测难度较大。为了在小缺陷时期及时发现损伤,防范事故发生,研究了基于传感阵列的导波检测信号增强方法。首先,建立导波的最大幅值圆周分布与管道损伤周向位置间的映射关系,实现缺陷的周向定位检测;其次,通过对不同时期的管道缺陷进行仿真模拟,验证了阵列导波检测信号增强方法的有效性;最后,搭建了基于阵列增强的超声导波管道损伤检测系统,对研究方法进行了实验验证。结果表明:基于阵列增强的导波检测法相对于传统检测法,可以将缺陷的回波幅值提升 4 倍左右,更易于发现管道损伤,实验定位误差在 5° 的范围内。

关键词 管道;超声导波;时间反转法;小缺陷;无损检测
中图分类号 TB52;TH702

引 言

管道在长期服役条件下受腐蚀、疲劳、外力作用等易发生损伤而造成大型事故,因此面向管道的健康监测非常重要。超声导波检测技术有能量衰减小、传播路径远的特点,在获得的结果中包含激励与接收点之间的所有信息,所以该方法非常适用于对长管道的缺陷识别与定位分析^[1-2]。在管道服役过程中,管体缺陷是随时间推移逐步形成的^[3],为防止缺陷的扩展,提高缺陷检出能力对于管道缺陷的诊断意义重大。

由于管道小缺陷造成回波的能量过小,被噪声淹没故难以识别。刘伯相等^[4]提出一种基于变分模态分解的自适应降噪的方法,利用该方法对管道缺陷定位准确度更高,结果更稳定。王悦民等^[5]提出了一种磁致伸缩导波缺陷检测方法,解决了管道小损伤尺寸定量分析问题。梁灏然^[6]提出一种基于 Duffing 系统的管道损伤导波检测方法,能够检测出管道小损伤的精确位置。成梦菲等^[7]提出了一种以 Poincare 截面为判断标准的小信号识别方法,能够对管道小缺陷进行高效的检测。

由于传统的导波检测技术主要依据缺陷回波来辨别缺陷的发生及轴向位置,故难以获取有关损伤的圆周位置信息。为实现缺陷的周向定位,许多学者采用传感器阵列的方法^[8-10],通过分析特征参数的圆周分布规律来获取管道缺陷的周向位置。

管道小缺陷检测困难主要是由于微弱的缺陷响应难以捕获和分析,虽然通过高功率激励装置或复杂信号分析方法可以缓解这一问题,但受实际应用条件的限制,高可靠性、低成本的缺陷检测技术还有待进一步研究。针对此问题,笔者采用传感阵列技术和时间反转增强法^[11-13],改进了传统的导波检测技术,为检测管道小型缺陷提供可行的思路。

1 管道中的导波传播特性

导波在管道中向前传播时可用 $F(n, m)$ 、 $L(0, m)$ 和 $T(0, m)$ 这 3 种模态表示,其中: n 为周向梯次; m 为沿管道径向方向的振动模态;两者都为整数。Gazis^[14]通过研究空管道频散方程,为管道缺陷检测时模态及工作频率范围的选择提供了理论指导。

空管道的群速度频散曲线如图 1 所示。由图可知,导波 $L(0, 2)$ 模态在所有可能出现的模态中最先

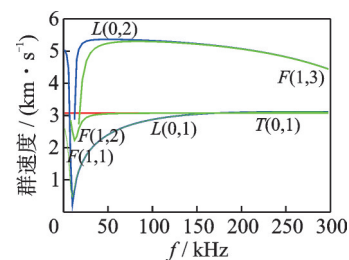


图 1 空管道的群速度频散曲线

Fig.1 Group velocity dispersion curves for empty ducts

* 国家自然科学基金资助项目(12002172,52105152)
收稿日期:2023-07-11;修回日期:2023-10-12

到达接收点,且在50 kHz~150 kHz频率范围内频散程度小,在传播过程中发生形变的可能性也小,据此可以辨别导波 $L(0,2)$ 模态。为了在检测时达到期望的结果,选取低频轴对称纵向 $L(0,2)$ 模态导波。

2 导波阵列时反增强原理分析

2.1 阵列时反导波聚焦效应

由于导波沿圆柱体多路径、长距离地传输,所以其不再是单一模态^[15-16]。为抑制除 $L(0,2)$ 外其他导波模态的影响,可以在管道端口环绕多个压电元件,组成传感器阵列,通过传感阵列产生的波场进行相互抵消,产生沿管道轴向方向传输的纵波。

利用时间反转的自适应能量聚焦作用,通过接收压电阵列获取声源的反射回波信号,对该信号进行波包截取并进行时反处理,然后在对应的接收压电阵列单元中进行再次激发,使其在损伤部位(即被动波源)产生能量集中,进而达到对损伤部位的重建聚焦^[17],从而提高对缺陷检测的灵敏度与准确度。

图2为管道缺陷示意图,由图可描述阵列时反聚焦原理过程。图中管道结构上预设传感器阵列,定义 $P_0(z_0, \theta_0, r_0)$ 为缺陷所在处, $P_i(z_i, \theta_i, r_i)$ 为传感器阵列中某一阵元 E_i 所处中间位置($i=1, 2, \dots, N$)。当传感器阵列激励导波向正前方传输到达损伤处时,由缺陷产生的信号可以表示为

$$S_i(\omega, (P_0 \rightarrow E_i)) = H(\omega, (P_0 \rightarrow E_i))E(\omega) \quad (1)$$

其中: ω 为角频率; $H(\omega, (P_0 \rightarrow E_i))$ 为波从点 $P_0(z_0, \theta_0, r_0)$ 传播到点 $E_i(z_i, \theta_i, r_i)$ 的传函数; $E(\omega)$ 为缺陷所生成回波信号的傅里叶变换。

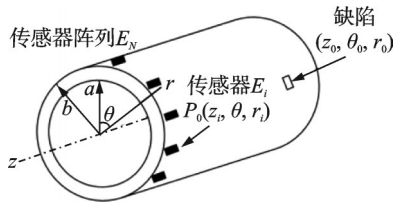


图2 管道缺陷示意图

Fig.2 Diagram of pipeline defects

根据互易性原理^[18],传感元件 E_i 接收到的时间反转信号为

$$S_i(\omega, (P_0 \rightarrow E_i)) = e^{i\omega\tau} H^*(\omega, (P_0 \rightarrow E_i)) E^*(\omega) \quad (2)$$

其中: $*$ 表示复共轭; τ 为时间延迟的长度。

此时共生成 N 个时反信号,分别将这些信号重新施加在对应的激励点上,在任意观测点 $P(z, \theta, r)$

得到的信号为

$$S_{\text{TR}}(\omega) = e^{i\omega\tau} \sum_{i=1}^N H(\omega, (P_k \rightarrow P)) H^*(\omega, (P_0 \rightarrow E_i)) E^*(\omega) \quad (3)$$

其中:下标TR表示时反信号; $H(\omega, (P_k \rightarrow P))$ 为由传感器 E_i 到缺陷 $P_0(z_0, \theta_0, r_0)$ 的传递函数。

将式(3)定义为

$$S_i(\omega, P) = H_{\text{TR}}(\omega, P) E^*(\omega) \quad (4)$$

其中

$$H_{\text{TR}}(\omega, P) = e^{i\omega\tau} \sum_{i=1}^N H(\omega, (P_k \rightarrow P)) H^*(\omega, (P_0 \rightarrow E_i)) \quad (5)$$

由式(4)推导出阵列中心处 E_i 激发的信号向观测点 $P(z, \theta, r)$ 传输的信号幅值计算公式^[19]为

$$|a_m(P)|^2 = \frac{\pi \Pi^4 |H_{\text{TR}}(\omega, P)|^2 |E(\omega)|^2}{2 \sqrt{1 + \Pi^4 \left(\frac{\partial^2 i_{nm}(\omega)}{\partial \omega^2} |z| \right)^2}} \quad (6)$$

其中: n 为信号的阶次; α_{nm} 为第 m 个信号的第 n 阶模态的幅值; Π 为半带宽。

$|z|$ 的表达式为

$$z = |z - z_n| \quad (7)$$

其中: z, z_n 分别为观测点、被动导波源到管道端口的纵向距离。

由式(6)可得,在 $|z|$ 取最小值时,观测信号的振幅取到最大值,即当时间反转激励波在管道中传播至损伤处时,损伤反射波包振幅将达到一个高峰,回波能量会被集中起来。此外,由缺陷引起的时反波场中,沿管道周向剖面的导波幅值分布相对于缺陷中心是对称的。在管道端口各节点施加时间反转激励信号后,从接收节点获取的信号截取缺陷波包,依次计算出其极大值,得到缺陷反射回波波包最大振幅的周向分布图,图中出现的能量聚焦处即为管道周向缺陷的中心位置。该方法也适用于管道结构中多个缺陷的周向定位检测。在超声导波检测中,将超声导波技术与全波形反演算法^[20]相结合实现损伤可视化是发展趋势,对时间反转导波检测技术的研究为管道缺陷三维成像奠定了基础。

2.2 基于信号增强的缺陷检测方法

根据上述原理,笔者提出一种基于阵列增强的超声导波检测方法。管道时反检测方法实现过程如图3所示。将阵列 L_1 和 L_2 设置于含损伤管道模型的

端口处,每一个阵列沿周向均布 M 个阵元,并且在阵列 L_1 中同时施加经汉宁窗调制的有限周期正弦导波 $U_1(t) \sim U_M(t)$,记录阵列 L_2 各接收节点上沿管道轴向的回波信号 $W_1(t) \sim W_M(t)$ 。

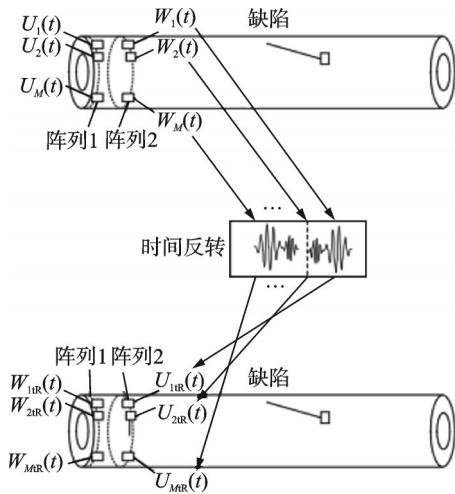


图3 管道时反检测方法实现过程

Fig.3 The implementation of the inverse pipeline detection method

由导波在管道中的传播特性可知,缺陷回波信号包括 $L(0,2)$ 导波模式及其他导波模式,利用矩形窗分别截取接收声源发射的缺陷波包,为保证截取的波包包含缺陷信号的所有信息,需计算 $L(0,2)$ 缺陷回波与其他模式缺陷回波到达时刻的差值,确定矩形窗宽,并选择固定时刻作为截取波包的开始时间点。将截取的缺陷波包信号进行时间反处理,得到的信号与时间反前的信号符合 $u_{TR}(t) = \omega(t - \Delta t)$ 。其中: Δt 为矩形窗的长度; $\omega(t)$ 为截获的处理前的损伤波包信号; $u_{TR}(t)$ 为时间反转激励信号。选择阵列 L_2 的各节点施加相应的时间反转激励信号,并在阵列 L_1 节点上再次获得管道回波信号。信号时反二次激励原理见图 4。通过对再次取得的管道回波信号进行相加,得到基于阵列增强的损伤信号。

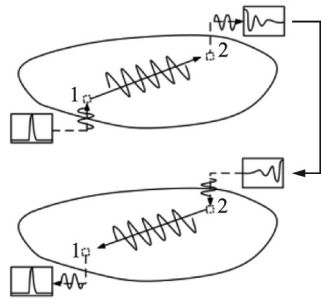


图4 信号时反二次激励原理图

Fig.4 Signal-time inverse secondary excitation schematic

3 实验验证

3.1 有限元仿真

采用有限元仿真对管道缺陷演化过程进行研究和分析,证明阵列时反增强法对小缺陷检出能力及辨识率的改善作用。在 ABAQUS 仿真软件环境下进行建模,创建外径为 16 cm、内径为 15.5 cm、长度为 2 m 的管道模型,材料设置为钢,其密度为 $7.932 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.286,弹性模量为 $2.169 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 。选择周向占比为 1/8 的缺陷作为管道仿真模型的最小截面缺损。为了对比分析,创建不同周向长度的缺陷来模拟管道缺陷扩展的过程,分别为占管道圆周长度 1/8、1/4、3/8 和 1/2 的损伤模型,裂缝中心在管道轴向 1 m 处。选择管道右端作为激励面,左端完全固定。

在管道端口周向均匀安装 2 个环形阵列 L_1 和 L_2 ,分别包含 8 个阵元作为激励节点与接收节点。激励信号选取中心频率为 70 kHz、汉宁窗调制的 5 波峰窄带信号。激励信号的数学表达式为

$$x(t) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f_c t}{n}\right) \right] \sin(2\pi f_c t) \quad (8)$$

其中: t 为激励时间; $x(t)$ 为信号幅值; n 为信号周期; f_c 为激励频率。

中心频率为 70 kHz 信号的时域和频率图见图 5。采用上述激励信号同时激励阵列中 L_1 单元的各个阵元,并从阵列 L_2 的阵元中同步获取响应信号,将响应信号相加得到直接导波检测法的检测结果。管道回波时程曲线见图 6,这是缺陷周向长度

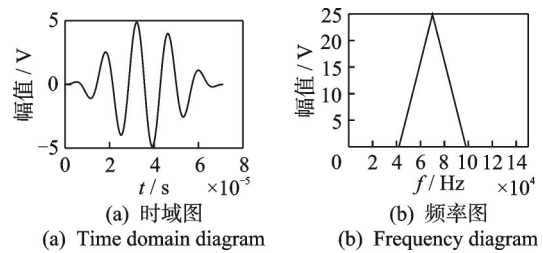


图5 中心频率为 70 kHz 信号的时域和频率图

Fig.5 Time and frequency plot of a signal with a centre frequency of 70 kHz

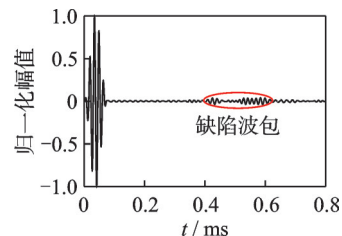


图6 管道回波时程曲线

Fig.6 Pipeline return time curve

占比为 1/8 的直接检测法获取的信号。可以看出,该方法得到的缺陷响应波包振幅很小且不易观察。

对阵列 L_2 中每个传感器所检测到的回波响应信号进行缺陷波包截取,截取的波包经过时反转处理后,得到新的激发信号,将这些信号施加在阵列 L_2 各阵元中,在阵列 L_1 监测节点上再次获取信号。因为多个激励信号有差异,接收到的损伤回波信号不能直接相比,必须将新检测到的信号进行归一化处理,最后进行叠加得到经阵列时反增强处理后的信号。如图 7 所示。可以看出,经阵列时反增强法后的缺陷波包信号的幅值有了不同程度的放大。

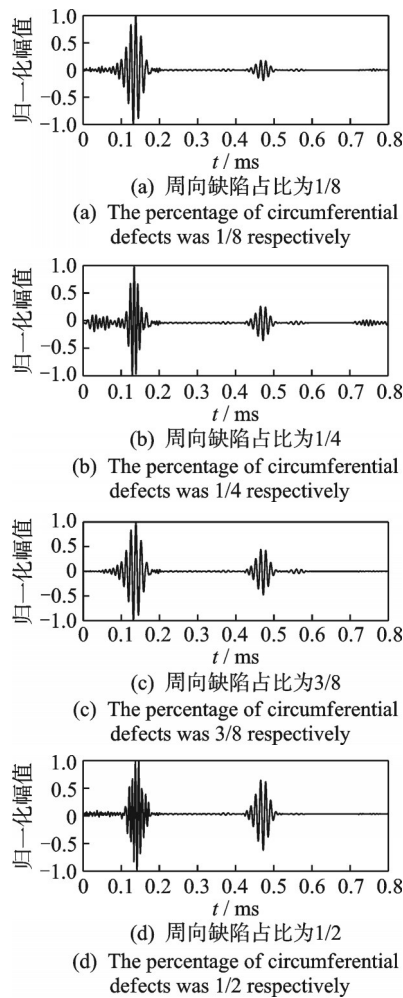


图 7 周向裂纹时间反转导波检测结果

Fig.7 Plot of circumferential crack time reversal guided wave detection results

本研究提取缺陷反射回波系数,以说明该法对缺陷波包幅值变化的影响。缺陷反射系数与裂纹大小的关系如图 8 所示。可以看出:当裂纹较小时,采用时间反转法,缺陷反射系数快速增加;随着裂纹的不断增大,该系数增加的速度较为缓和,说明时间反

转法对检测小的管道损伤更有效。

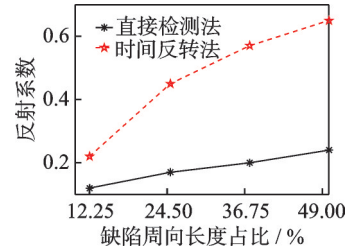


图 8 缺陷反射系数与裂纹大小的关系

Fig.8 Defect reflection coefficient as a function of crack size

从图 7 中得到激励波幅值最大值对应的时刻 t_0 为 0.042 1 ms,缺陷回波幅值最大值对应的时刻 t_1 为 0.415 ms,由频散曲线获得导波在管道中传播的速度 v 为 5 321 m/s,则损伤纵向位置到激励端口的距离 x 为

$$x = v(t_1 - t_0) / 2 = \frac{5\,321 \times (0.415 - 0.0412) \times 10^{-3}}{2} = 0.994 \text{ m} \quad (9)$$

在有限元模拟中裂纹到激励端口的距离为 1 m,计算纵向定位有 0.6% 的误差,满足大多数检测的要求。

在管道模型中选取任意一条母线作为 0° 的母线位置,当时反信号到达缺陷处时,由缺陷处 8 个均匀分布的接收阵元获取回波信号,通过监测这些信号因损伤反射而产生的缺陷波包最大振幅的周向分布来获取缺陷的周向位置。损伤回波波包最大振幅圆周分布曲线如图 9 所示。可见,能量集中在 180° 母线位置处,即缺陷所处管道周向的中心位置。

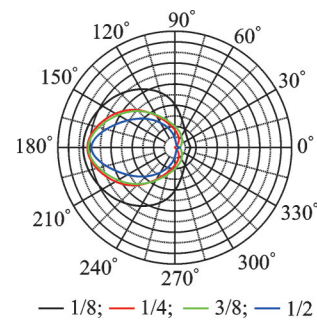


图 9 损伤回波波包最大振幅圆周分布曲线

Fig.9 Circumferential distribution of the maximum amplitude of the damage echo packet

3.2 实验验证与结果分析

3.2.1 单缺陷实验验证

在实验室搭建一套管道缺陷检测系统,其由

KH7500系列功率放大器、电荷放大器、用于激励和接收的小岛型压电传感器、被测管道、计算机及PicoScope4842示波器组成。图10为管道缺陷检测系统示意图。其中： L_1 、 L_2 阵列分别为在管端均匀分布的8个压电传感器。

在管道表面实际制造缺陷较为困难，而采用人工加载质量块的方式可以改变被测结构局部阻尼特

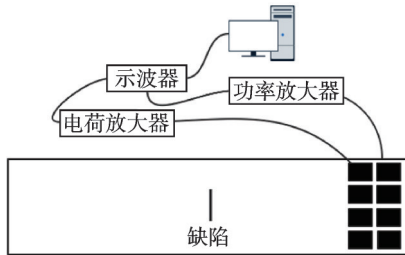


图10 管道缺陷检测系统示意图

Fig.10 Diagram of the pipeline defect detection system

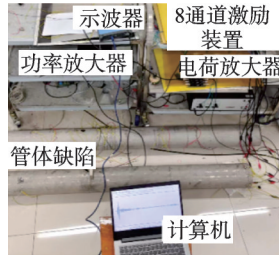


图11 管道损伤检测实验装置连接图

Fig.11 Connection diagram for pipeline damage detection experiments

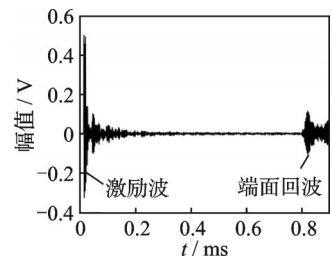


图12 健康管道回波时程曲线

Fig.12 Healthy pipeline return time curve

首先，进行直接检测。图13为直接导波检测管道回波时程曲线。由图可知，所获得的缺陷回波波包峰值为0.048，缺陷响应信号幅值微弱。

利用阵列时反增强法对管道缺陷进行检测，将该法与直接检测法获取的检测信号结合起来进行分析。时间反转前后管道损伤回波信号对比如图14所示。对时反后的信号进行分析，可得到缺陷所在轴向位置距激励端口1.017 m，误差为1.7%。

由于缺陷回波峰值出现在0.4~0.5 ms的时间

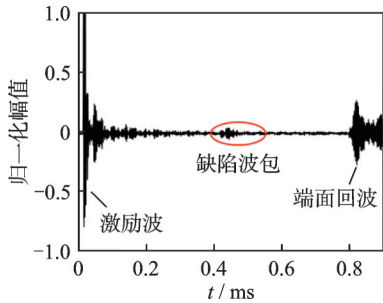


图13 直接导波检测管道回波时程曲线

Fig.13 Direct waveguide detection of pipe return time profiles

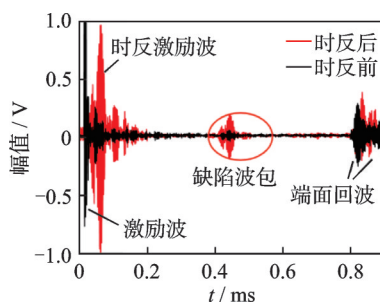


图14 时间反转前后管道损伤回波信号对比

Fig.14 Comparison of pipe damage echo signals before and after time reversal

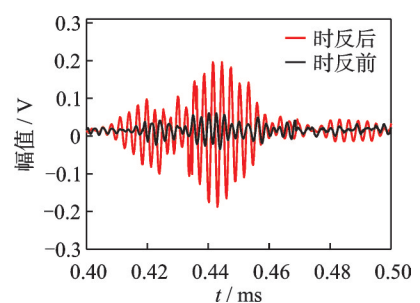


图15 时反前后管道损伤回波细节对比

Fig.15 Detailed comparison of pipe damage echoes before and after time reversal

实际管道损伤回波波包最大振幅分布如图16所示。由图可知，损伤回波最大峰值出现在周向182°的位置，与缺陷的实际位置基本吻合。因此，通过时反波场幅值分布图出现的波峰位置，即可实现对损伤的周向定位。

3.2.2 双缺陷实验验证

在上述单一缺陷的管道上再次粘贴相同大小的质量块来模拟周向裂纹损伤，缺陷2的中心位置距

性，引起的信号改变与实际缺陷结果相似^[21]。因此，实验选用宽度为2 cm的质量块粘贴到1根长度为2 m、外径为16 cm、内径为15.5 cm的管道中，模拟径向缺陷占比为1/16的损伤。管道损伤检测实验装置连接图如图11所示。

在检测管道损伤之前，获取了健康管道的回波信号。健康管道回波时程曲线如图12所示。

段，为更直观地分析时反前后缺陷波包峰值的变化，截取0.4~0.5 ms的波段进行时域分析。时反前后管道损伤回波细节对比如图15所示。由图可知，直接导波检测法获得的缺陷回波波包峰值为0.048，经时反处理后的缺陷波包峰值为0.225，增大了4.7倍左右。这表明基于阵列时反增强的导波检测法可改善直接导波法对管道小缺陷检测的不足，有利于基于缺陷回波响应信号的定位分析与损伤特征判别。

离管道激励端1.5 m，且两缺陷的中心之间的圆周位置相差90°。管道双缺陷损伤回波信号如图17所示。利用轴向定位计算公式得到缺陷2中心位置距管道激励端口1.513 m。

在各传感节点分别截取缺陷1和缺陷2反射波包，经时间反转处理并作为二次激励波作用后，将接收节点获得的回波信号叠加，并与直接检测法的缺陷回波波包进行对比。双缺陷时间反转前后检测信

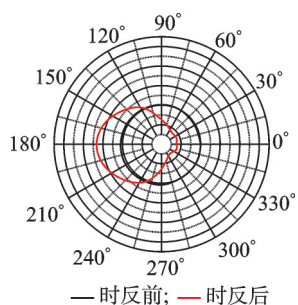


图 16 实际管道损伤回波波包最大振幅分布

Fig.16 Maximum amplitude distribution of actual pipeline damage echo wave packets

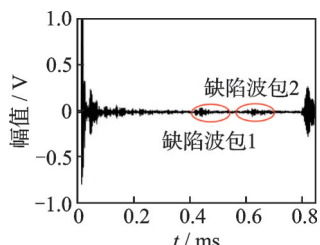


图 17 管道双缺陷损伤回波信号

Fig.17 Pipeline double defect damage echo signal

号对比如图 18 所示。由图可知,经过时反处理后,缺陷 1、缺陷 2 处信号的幅值都明显增大。

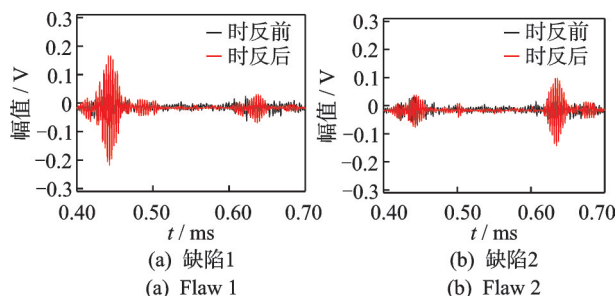


图 18 双缺陷时间反转前后检测信号对比

Fig.18 Comparison of detection signals before and after time reversal of double defects

分别从缺陷 1、缺陷 2 时反处理后各接收节点所获取的回波信号中截取缺陷波包,绘制不同缺陷对应的损伤反射波包最大幅值圆周分布曲线。双缺陷时间反转前后检测信号对比如图 19 所示。根据导

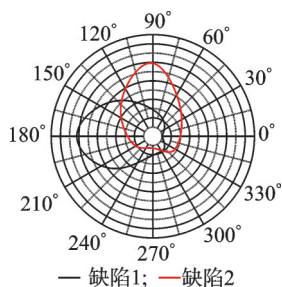


图 19 双缺陷回波波包最大振幅圆周分布曲线

Fig.19 Circumferential distribution curve of maximum amplitude of double defective echo wave packet

波能量聚焦情况可知,缺陷 1、缺陷 2 所处周向角度分别为 180°和 94°。

4 结 论

1) 阵列时反增强的导波检测法改善了超声导波检测技术在检测管道损伤方面的不足,有利于小缺陷检测,促进了管道早期损伤的及时发现。

2) 利用传统的导波检测法,获取的信号在外界噪声干扰下不易观察,而采用阵列时反增强的导波检测法进行信号增强处理后,将缺陷回波幅值提高了 4 倍左右,增加了管道缺陷检测的可靠性。

3) 通过观察时间反转回波波包振幅的周向分布规律,可以获得管道中缺陷的周向位置。

参 考 文 献

[1] ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 454.

[2] 刘丁楠,李富才,苏文胜. 充液管道超声导波传播特性及损伤定位的研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(4): 135-141.

LIU Dingnan, LI Fucui, SU Wensheng. Ultrasonic guided wave propagation characteristics and damage localization in liquid filled pipes[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(4): 135-141.(in Chinese)

[3] 何育民,高攀,张小龙,等. 局部柔度变化在管道裂纹定量识别中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(6): 1184-1189.

HE Yumin, GAO Pan, ZHANG Xiaolong, et al. Application of local flexibility variation in quantitative identification of pipeline cracks[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(6): 1184-1189. (in Chinese)

[4] 刘伯相,张远民,江竹. 基于变分模态分解的管道泄漏信号降噪方法[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(2): 397-403.

LIU Boxiang, ZHANG Yuanmin, JIANG Zhu. Noise reduction method of pipeline leakage signal based on variational mode decomposition [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(2): 397-403.(in Chinese)

[5] 王悦民,陈昂,汤槟晖,等. 磁致伸缩超声导波管道检测小缺陷定量分析方法研究[J]. 海军工程大学学报, 2022, 34(3): 80-87.

WANG Yuemin, CHEN Ang, TANG Binhui, et al. Quantitative analysis of small defects in pipeline by magnetostrictive ultrasonic guided wave[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2022, 34(3): 80-87. (in Chinese)

- [6] 梁灏然. 基于Duffing系统随机共振特性的聚脲防腐管道小缺陷导波检测研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [7] 成梦菲, 张伟伟, 王晶, 等. 基于Poincare截面突变特性的管道小缺陷识别与评估[J]. 振动与冲击, 2022, 41(2): 161-168.
CHENG Mengfei, ZHANG Weiwei, WANG Jing, et al. Small defect identification and evaluation for a piping line based on Poincare cross-section sudden changes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(2): 161-168. (in Chinese)
- [8] 徐阳, 罗明璋, 杜国锋. 基于超声导波的管道缺陷监测及径向损伤评估[J]. 石油机械, 2021, 49(8): 142-151.
XU Yang, LUO Mingzhang, DU Guofeng. Pipeline defect monitoring and radial damage assessment based on ultrasonic guided wave[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(8): 142-151. (in Chinese)
- [9] 高耀东, 范要鹏. 基于时间反转法的管道焊缝区缺陷检测研究[J]. 现代制造工程, 2021(4): 114-120, 113.
GAO Yaodong, FAN Yaopeng. Research on defect detection in welding seam zone of pipe based on time reversal method[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(4): 114-120, 113. (in Chinese)
- [10] 王建斌, 杜云朋, 张轩硕. 基于改进时间反转法的超声导波检测系统构建[J]. 中国测试, 2014, 40(2): 130-134.
WANG Jianbin, DU Yunpeng, ZHANG Xuanshuo. Establish ultrasonic guided wave testing system based on improved method of time reversal[J]. China Measurement & Test, 2014, 40(2): 130-134. (in Chinese)
- [11] 周进节, 何存富, 郑阳, 等. 时反导波对管中通透裂纹扩张过程的检测规律研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(6): 1128-1136.
ZHOU Jinjie, HE Cunfu, ZHENG Yang, et al. Time-reversal method of guided waves for crack expanding inspection in pipeline[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(6): 1128-1136. (in Chinese)
- [12] ZONZINI F, TESTONI N, MARZANI A, et al. Low depth time reversal modulation technique for ultrasonic guided waves-based communications [C] //2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2020: 1-4.
- [13] FURUSAWA A, KOJIMA F, MORIKAWA A. Mode control of guided wave in magnetic hollow cylinder using electromagnetic acoustic transducer array[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2015, 47(2): 196-203.
- [14] GAZIS D C. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders I: analytical foundation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1959, 31(5): 568-573.
- [15] 王国锋, 李富才, 刘志强, 等. 超声导波在圆管结构损伤定位中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(3): 440-448.
WANG Guofeng, LI Fucui, LIU Zhiqiang, et al. Research on ultrasonic guided wave-based damage localization for pipeline structure[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(3): 440-448. (in Chinese)
- [16] FU H, WU B, ZHOU J J, et al. Synthetic time-reversal focusing method for guided wave pipeline inspection [C] //2012 Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application. Sanya, China: IEEE, 2012: 1517-1520.
- [17] 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.
- [18] 周进节, 郑阳, 杨齐, 等. 管道超声导波分段时间反转检测方法研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 78-86.
ZHOU Jinjie, ZHENG Yang, YANG Qi, et al. Pipeline section time reversal inspection method with ultrasonic guided waves[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(12): 78-86. (in Chinese)
- [19] 邓菲, 吴斌, 何存富. 基于时间反转的管道导波缺陷参数辨识方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 18-24.
DENG Fei, WU Bin, HE Cunfu. Time reversal guided wave defect identification method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(8): 18-24. (in Chinese)
- [20] 许文进. 基于超声导波全波形反演的缺陷检测技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- [21] CHOI S W, FARINHOLT K M, TAYLOR S G, et al. Damage identification of wind turbine blades using piezoelectric transducers[J]. Shock and Vibration, 2014, 2014(1): 1-9.



第一作者简介:刘迪,女,1998年8月生,硕士。主要研究方向为结构健康监测。
E-mail:172322387@qq.com

通信作者简介:王强,男,1980年5月生,博士、教授。主要研究方向为结构健康监测。
E-mail:wangqiang@njupt.edu.cn