

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306676

管道电磁超声传感器阵列检测技术研究*

刘 轩¹ 吕 炎² 边 策¹ 宋国荣² 高 杰² 何存富²

(1. 北京工业大学材料与制造学部 北京 100124; 2. 北京工业大学信息学部 北京 100124)

摘 要:采用电磁超声传感器阵列对管道进行缺陷检测,不仅能够提高电磁超声检测信号的信噪比、灵敏度与分辨能力,同时也能增强电磁超声检测的直观性与灵活性。本文详细阐述了基于洛伦兹力的周期永磁铁阵列式电磁超声传感器(PPM-EMAT)激励超声导波的工作原理,及利用全聚焦算法结合极性一致性算法对缺陷进行定位与成像的工作机理。建立了有限元仿真模型,验证了准T(0,1)模态导波在管道结构中的传播过程。利用研制的多通道电磁超声检测系统,对含缺陷的不锈钢管道进行了检测实验,实验结果表明,研制的系统能够检测出管道试样中的多个通孔缺陷,纵向定位误差可控制在1.5%以下,实现了基于阵列电磁超声传感器的管道缺陷成像与定位。

关键词: 超声导波;管道检测;传感器阵列;电磁超声

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Electromagnetic acoustic transducer array of pipeline inspection technology

Liu Xuan¹ Lyu Yan² Bian Ce¹ Song Guorong² Gao Jie² He Cunfu²

(1. Department of Materials and Manufacturing of Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Faculty of Information Technology of Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The utilization of electromagnetic ultrasonic sensor arrays for pipe defect detection not only improves the signal-to-noise ratio, sensitivity and resolution of electromagnetic ultrasonic detection signals, but also enhances the intuitiveness and flexibility of electromagnetic ultrasonic detection. In this paper, the working principle of the Lorentz force-based periodic permanent magnet array-type electromagnetic ultrasound transducer (PPM-EMAT) for excitation of ultrasound guided waves was referred and the mechanism of defect localization and imaging was used by the TFM and the SCF. Then the FE model was built to verify the process of quasi-T (0,1) mode guided wave propagation in a pipeline structure. Finally, the developed multi-channel electromagnetic ultrasonic inspection system was used to perform actual inspection of stainless-steel pipelines with defects and verify the simulation results. The experimental results show that the developed system can detect multiple through-hole defects in the pipeline specimen, and the longitudinal positioning error can be controlled below 1.5%, which verifies that the array electromagnetic ultrasonic sensor pipeline inspection method can realize the defect imaging and defect positioning of the pipeline.

Keywords: ultrasonic guided wave; pipeline inspection; sensor arrays; electromagnetic ultrasound

0 引 言

管道作为石油、天然气、化工等运输行业的关键基础设施,保证其正常运作对安全生产和工业化建设具有重要的意义^[1]。因此,工业管道检测技术的研发和应用受

到了高度重视。随着超声检测技术的更新与发展,以该技术手段为基础发展的导波阵列检测技术也被广泛应用于管道检测。

超声导波具有检测距离长、范围广、效率高和成本低的优势,非常适用于工业长距管道的缺陷检测^[2-3];另一方面,阵列超声检测技术能够控制阵列中各个传感器的

激励延迟时间,从而实现声束偏转和聚焦^[4]。相比于采用单个超声传感器进行导波检测,采用阵列式传感器布置,能够进一步提高管道缺陷检测效率和信号信噪比^[5-6]。然而,由于导波的多模态的特性和传播的复杂性以及管道的空心圆柱形结构,如何提高管道导波阵列检测性能仍是一个挑战。Niu 等^[7]提出一种轴向多传感器阵列叠加模型,可在管道中激励准轴对称 $T(0,1)$ 模态导波。实验结果表明利用该模型能够有效抑制高阶弯曲模态导波,且准轴对称 $T(0,1)$ 模态导波对管道轴向缺陷灵敏度很高。Wang 等^[8]利用双环超声传感器阵列在管道结构中激励螺旋 Lamb 波,并利用基于超声衍射原理的层析成像技术,对管道环向截面和轴向截面进行高分辨率成像,图像重建误差在 2.6%。Wang 等^[9]系统分析了管道缺陷的径向深度和周向范围对纵向模态的影响。结果表明,当 $L(0,1)$ 或 $L(0,2)$ 模态与缺陷相互作用时,会发生模式转换。当缺陷沿径向扩展时,反射信号中主 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模态导波的反射系数单调增加,而转换模态的能量近似呈半正弦波的趋势增加;当缺陷沿周向扩展时,所有模态的反射系数线性增加。王松浩等^[10]利用两个环形换能器阵列分别接收与管道缺陷相关的反射/透射信号,利用变分模态分解法对信号进行滤波,在此基础上进行小波变换获得缺陷反射的导波时频信息从而定位缺陷。

目前,管道超声导波阵列检测存在的另一个问题在于传感器的限制。采用压电超声传感器阵列进行管道缺陷检测时,通常需要传感器与管道较好的耦合,一般需要使用耦合剂将传感器贴在管道表面,对于有涂层或表面粗糙的管道而言,还需要对管道表面进行打磨处理,这不利于管道缺陷的快速检测与实际工程应用。而电磁超声传感器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 阵列的优势就在于无需使用耦合剂,这使得管道导波阵列检测更为方便快捷^[11-12]。依靠电磁场激发声场的原理主要有磁致伸缩效应和洛伦兹力机理两种^[13-14]。磁致伸缩效应仅适用于铁磁性材料,而洛伦兹力机理既可用于铁磁性材料也可用于非铁磁性材料。Wang 等^[15]提出一种由线性线圈 EMAT 阵列组成的磁致伸缩贴片换能器 (MPT),该换能器能够很好地跟管道表面贴合,有效激发 $T(0,1)$ 模态导波,具有更宽的带宽,可实现连续扫频检测方法。Thon 等^[16]利用有限元模拟对比了不同配置的 PPM-EMAT 对高阶 SH 模态导波的影响,研究表明磁铁与管道的提离距离严重影响导波的产生。周进节等^[17]组建了双环 24 阵元 EMAT 阵列试验系统,以管道中圆环波前单一 S_0 模态兰姆波为例,研究了螺旋导波的形成过程,及其在激励源所在圆周和管段上的传播规律。

针对管道缺陷定位检测问题,本文对极性一致成像算法和基于洛伦兹力机理的电磁超声换能机理进行了分

析,通过建立有限元仿真模型分析了准 $T(0,1)$ 模态导波在管道中的传播过程,并对以往的 PPM-EMAT 进行参数优化。开发了一套多通道管道导波检测系统,将 16 个 PPM-EMAT 沿管道周向均匀排列,在 153 kHz 下激励准 $T(0,1)$ 模态导波,对一根含有通孔缺陷的不锈钢管道进行了检测。结果表明,该系统能够快速实现管结构成像检测,对缺陷的纵向和周向定位精度高,系统工作稳定性好。

1 管道阵列传感器聚焦成像方法

1.1 全聚焦成像方法

全聚焦成像法 (total focusing method, TFM) 是一种基于全矩阵数据的虚拟聚焦后处理成像技术,该方法主要分为全矩阵数据采集和全聚焦成像两个部分。

对于 N 个阵元的传感器阵列,其全矩阵数据的采集流程为:激励传感器阵列中的第 1 个阵元,阵列中的所有阵元同时采集信号,便可获取 N 个回波信号。然后依次使传感器阵列中的各个阵元激励,重复上述采集过程,共可获得 N^2 个回波信号。将全部采集到的信号按传感器顺序填入二维网络矩阵中,生成全聚焦成像的全矩阵数据,如图 1 所示,其中数据 P_{ij} 包含回波信号的时间与幅值信息。

T \ R	1	2	...	j	...	N
1	P_{11}	P_{12}	...	P_{1j}	...	P_{1N}
2	P_{21}	P_{22}	...	P_{2j}	...	P_{2N}
...	...	...	...	...	...	...
i	P_{i1}	P_{i2}	...	P_{ij}	...	P_{iN}
...	...	...	...	...	...	...
N	P_{N1}	P_{N2}	...	P_{Nj}	...	P_{NN}

图 1 全矩阵数据

Fig. 1 Full matrix data

TFM 成像原理如图 2 所示,将管道沿 1 传感器与最末位传感器之间的轴向边界模拟展开,建立平面直角坐标系,并将管道待测区域离散成网格。利用全矩阵数据实现待测区域内所有虚拟聚焦点的成像。对于任一聚焦点,根据各阵元到该点的声程关系,求解所有回波信号在该点的幅值,将各幅值进行叠加获得表征该点信息的幅值,再重复以上过程,即可求得所有聚焦点的幅值信息^[18]。

单一聚焦点 M 的幅值 $I(x_0, y_0)$ 可表达为:

$$I(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{ij}(t_{ij}(x_0, y_0)) \quad (1)$$

式中: P_{ij} 表示第 i 个阵元发射、第 j 个阵元接收的超声

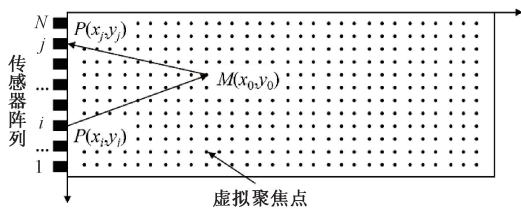


图 2 聚焦成像原理

Fig. 2 Focused imaging principle

信号在 M 点处的幅值。 t_{ij} 则是表示声波从发射元 i 到聚焦点 M 再反射回接收阵元 j 所需的时间, 其计算公式为:

$$t_{ij}(x_0, y_0) = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + y_0^2} + \sqrt{(x_j - x_0)^2 + y_0^2}}{c} \quad (2)$$

式中: x_i, x_j 分别表示发射阵元与接收阵元的横坐标; c 为导波传播速度。

1.2 极性一致成像方法

传感器阵列相位成像, 是在 TFM 计算全矩阵数据幅值信息的基础上, 在算法中加入了全矩阵数据中回波信号的相位信息。相位成像方法能够降低噪声对信号幅值的影响以及旁瓣和栅瓣的干扰, 同时能够有效改善因传感器阵列声束指向性不一致导致的成像质量下降问题, 提高成像的信噪比。

对于连续信号, 可以将信号相位所在的范围表示为信号的正负极性, 当信号的相位在同一区间时, 信号极性一致, 那么信号可以被认为是聚焦信号进行叠加运算, 这种方法称为极性一致成像 (SCF)。SCF 作为相位成像的一种, 同时也是一种基于分析信号符号极性方差的算法^[19], 对噪声的抑制效果更好。全矩阵数据 P_{ij} 中信号的符号极性 b_{ij} 表示为:

$$b_{ij}(x, y) = \begin{cases} +1, P_{ij}[t_{ij}(x, y)] \geq 0 \\ -1, P_{ij}[t_{ij}(x, y)] < 0 \end{cases} \quad (3)$$

利用阵列数据的极性信息成像, 定义极性一致成像为:

$$I_{SCF}(x, y) = 1 - \sigma = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N b_{ij}(x, y) \right)^2} \quad (4)$$

式中: σ 表示符号极性 b_{ij} 的标准差。

在 SCF 中, 每一个成像点都与阵列传感器信号的代数符号之和有关, 在有缺陷的位置, 符号的极性会呈现一个相对较大的值; 而在没有缺陷的位置, 代数的符号是随机的, 叠加后会使其值接近于 0。因此, 通过 SCF 处理后的全矩阵数据能够提高缺陷成像的质量。

2 基于洛伦兹力的电磁超声换能机理

基于洛伦兹力的 EMAT 传感器是由交流线圈和磁铁组成。交流线圈通电后会在试样中产生感应涡流, 此时感应涡流会受到交流线圈产生的动态磁场以及磁铁产生的静磁场的共同作用, 产生交变的洛伦兹力^[20]。交变洛伦兹力将产生周期性振动, 从而直接在试样中产生导波。通过控制静磁场和励磁电流的方向, 可以得到特定方向的洛伦兹力, 其频率由励磁电流决定。

PPM-EMAT 工作原理如图 3 所示, 相邻永磁铁之间磁性相反, 充磁方向为厚度方向。跑道型线圈的直线区域为传感器工作的有效区域, 当线圈通入频率 f 的交变电流时, 在试件表面集肤深度内产生与跑道方向相反的涡流。根据洛伦兹力原理, 图示 6 列永磁铁在试件集肤深度内交错产生 3 组方向相反的剪切力, 从而在板中或管中激励 T 模态导波。此时, 每组磁铁的宽度应为激发导波的波长的 $1/2$, 这样可以最大化地提高传感器的激励效率。

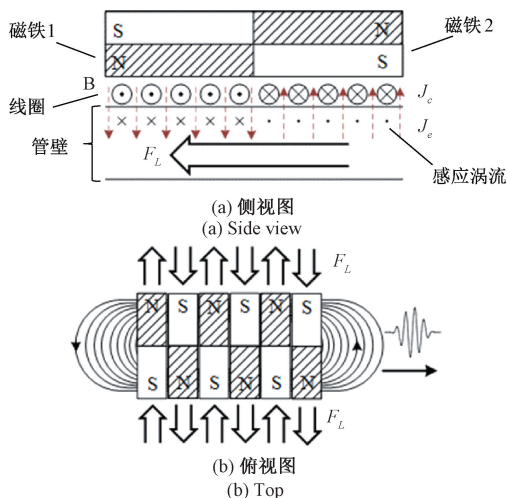


图 3 PPM-EMAT 工作原理

Fig. 3 PPM-EMAT working principle

3 管道导波激发有限元仿真分析

利用 ABAQUS 进行建模仿真分析。在仿真中只需将剪切力加载到不锈钢管表面, 进而模拟导波在管道中传播的过程, 所以不涉及磁场和电场耦合问题。在 ABAQUS 中按照实验管道试样参数设置建立管道模型, 主要的几何和材料参数如表 1 所示。

为了模拟 PPM-EMAT 传感器在管道表面激发准 T (0,1) 模态导波的过程, 将管道一端以 10 mm 为步长, 沿管道轴向从管道端面向管道中心划分出 6 段, 用于模拟传感器内部 6 组 10 mm 宽的磁铁。同时在管道周向方向

表 1 有限元仿真模型参数表

Table 1 Finite element simulation model parameters

参数	数值/类型
材料	不锈钢
尺寸/mm	内径 130、壁厚 5、长度 2 000
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 932
弹性模量/GPa	193
泊松比	0.30

上等分 16 个单元,在其中的一个单元上进行力的加载,用于模拟单一传感器激励。激励波形设置为 153 kHz 的 5 周期汉宁窗调制的正弦信号,如图 4 所示。采用六面体结构化网络对管道模型进行网格划分,网格尺寸设置为 1.5 mm,满足网格尺寸小于 1/8 波长的要求。

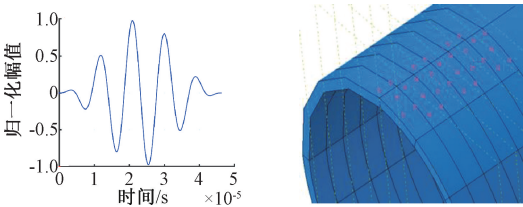


图 4 管道表面载荷的加载方向及波形

Fig. 4 Loading direction and waveform of the pipe surface load

利用该模型进行仿真计算,得到如图 5 所示的位移云图,在模型中除了激发的准 $T(0,1)$ 模态导波,还产生了幅值很低的其他模态导波,其影响基本可以忽略不计。

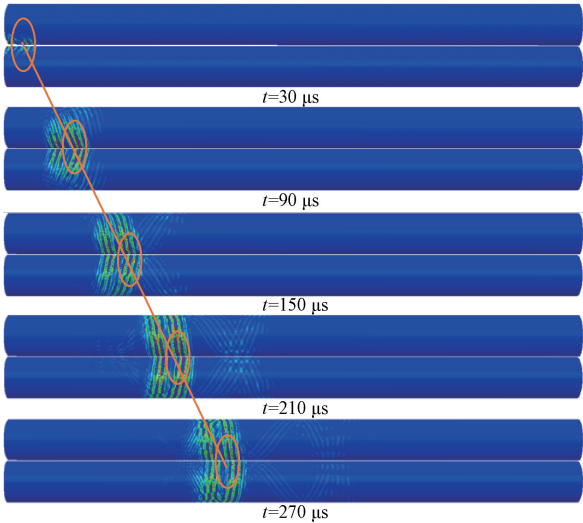


图 5 不同时刻准 $T(0,1)$ 模态导波传播云图

Fig. 5 Quasi- $T(0,1)$ mode guided wave propagation cloud at different moments

提取传感器前端和距离传感器 1 000 mm 处的位移波形,经计算得到的导波波速为 3 069 m/s,与 153 kHz 的 $T(0,1)$ 模态导波的理论波速吻合。因此,由上述仿真证

明了 PPM-EMAT 传感器在能够在不锈钢管道表面激发准 $T(0,1)$ 模态导波,初步验证了准 $T(0,1)$ 模态导波激励检测方案的可行性。

4 多通道电磁超声检测系统研制

4.1 电磁超声传感器设计

传感器的实物图如图 6 所示。针对传感器的几何尺寸、磁铁配置形式等传感器参数进行仿真设计,依靠优化的传感器参数能够进一步提高其换能效率。主要的参数包括:线圈的长宽、单一永磁铁的宽度及永磁铁层数。

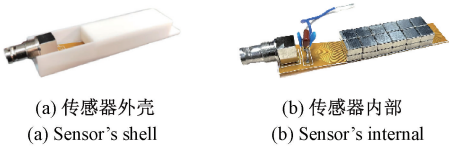


图 6 电磁超声传感器

Fig. 6 Electromagnetic ultrasound sensors

传感器所用的跑道型线圈一般采用柔性电路板印刷的方式制作,整体厚度接近 1 mm。宽度受管道试样的周长限制,为保证能在管道表面放置 16 个传感器,故宽度设计成 20 mm,以这一宽度设计的传感器可以保证在管道表面设置成 16 个传感器阵列。传感器长度至少 6 磁铁的宽度,因此应大于 3 倍的波长,设置为 80 mm。由于线圈整体尺寸固定,线圈匝数越多,单根导线截面积越小,在此将导线匝数设置为 200 匝,截面积设置为 $1\times 10^{-9}\text{ m}^2$ 。

由于线圈宽度为 20 mm,因此将单个磁铁宽度设置成从 5~20 mm,以 5 mm 为步长,依次进行仿真,选取最合适的磁铁宽度。根据不同磁铁宽度在采样点处产生的磁通密度,将二者关系绘制成折线,如图 7 所示。在磁铁宽度等于线圈宽度的 1/2 时,产生了最大的磁通密度,即 10 mm 为最佳宽度。

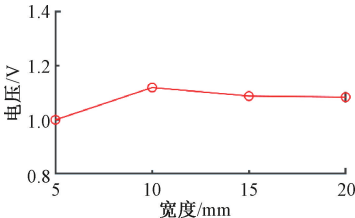


图 7 磁铁宽度与磁通密度的关系

Fig. 7 Relationship between magnet width and magnetic flux density

传感器的高度基本没有限制,增加磁铁高度或每个位置上磁铁的数目能够增加磁通密度,从而提高换能效

率,但换能效率与磁铁层数的对应关系仍需通过仿真计算得出。将从 1~5 层的磁铁阵列在采样点处产生的磁通密度进行提取,对应不同层数的变化图如图 8 所示。当磁铁层数从 1 层增加到 2 层时,磁通密度的提升最为明显,往后增加的层数则无法带来较大的提升。可能是由于厚度增加导致的磁铁自身磁阻增加,影响了磁通密度的提升。

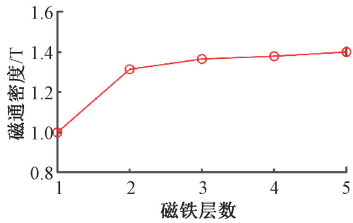


图 8 磁通密度与磁铁层数的关系

Fig. 8 Relationship between magnetic flux density and number of layers of magnets

4.2 多通道电磁超声检测系统设计

管道电磁超声阵列检测需要一套能够对阵列电磁超声传感器进行激励采集的系统。为了应用于全矩阵数据采集,需要系统能够进行单通道电磁超声传感器的激励以及 16 通道电磁超声传感器的数据采集,各通道之间相互独立。同时,由于 EMAT 传感器换能效率较低,噪声干扰较大,激励模块需要大功率的功率放大电路,16 通道同步数据采集模块需要滤波放大电路。此外,为了满足激励单一模态导波的需求,激励信号选择 5 周期汉宁窗调制的正弦波。表 2 为系统基本参数指标。

表 2 电磁超声检测系统主要技术指标

Table 2 Parameters of the electromagnetic ultrasound equipment indicators

参数	设计指标
最大激励功率	5 000 W
激励频率范围	10 kHz~1 MHz
最大激励电压	>1 000 V _{pp}
程控增益范围	120~160 dB
最大采样率	100 MHz
采样长度	655 μs @ 50 MHz
供电电源	220 V AC

系统主要包括多通道导波信号激励电路、多路复用电路、大功率激励信号放大电路、多通道采集信号滤波放大电路、多通道信号同步采集电路、电源及数据接口电路、系统上位机等。图 9 为检测系统总体结构示意图,图 10 为检测系统实物图。

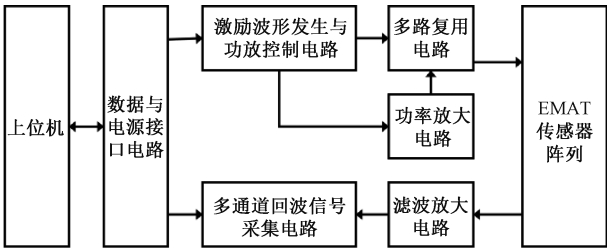


图 9 多通道电磁超声检测系统总体结构

Fig. 9 Structure of the multi-channel electromagnetic ultrasound inspection system

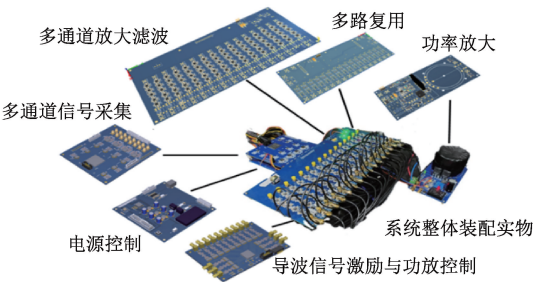


图 10 多通道电磁超声检测系统实物图

Fig. 10 Physical view of the multi-channel electromagnetic ultrasound inspection system

5 实验

5.1 电磁超声传感器导波激发测试

为了验证电磁超声传感器的激励与接收能力,对多通道导波信号激励电路、功率放大电路、多路选通电路、滤波放大电路和电磁超声传感器进行导波激励测试实验。传感器的激励接收方式分别为自激自收和一激一收,通过示波器对传感器激励的导波信号进行采集,测试布置示意图如图 11 所示。

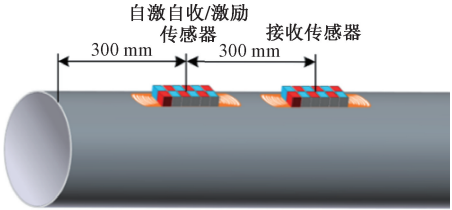


图 11 测试布置示意图

Fig. 11 Test arrangement schematic

测试实验在不锈钢管道试样上进行,激励频率设置为 153 kHz,激励信号的重复时间间隔设置为 500 ms。首先进行一激一收的测试,激励传感器位于管道一端,距端面 300 mm,接收传感器在距离激励传感器 300 mm 处放置。激励传感器与多路复用电路连接,接收传感器

与滤波放大电路连接后,信号经过滤波放大电路进入示波器。

通过示波器采集到的激励和接收信号如图 12 所示。图 12(a)表示传感器能够接收到两个明显的波峰,通过计算波速可知,第 1 个波峰是激励传感器激励出的直达波信号,第 2 个波峰是传感器激励信号经过端面反射后的信号。同时计算出的波速与准 $T(0,1)$ 模式导波吻合,说明研制的电磁超声传感器能够在管道表面激发出准 $T(0,1)$ 模式导波。图 12(b)中可以看到幅值较高的激励信号与端面回波信号。综上所述,该传感器能够激励出信噪比较高的准 $T(0,1)$ 模式导波,同时能够实现大功率超声信号激励与传感器接收信号的滤波放大,且一个电磁超声传感器可以实现超声信号的自激自收,因此可以用来进行管道的检测实验。

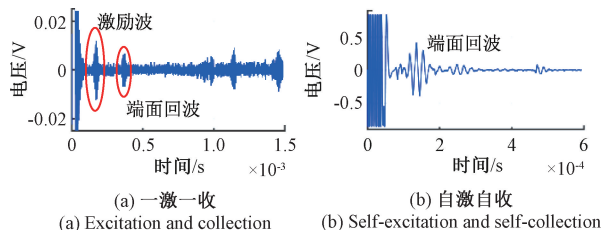


图 12 传感器采集到的导波信号

Fig. 12 Guided wave signals from sensors

5.2 管道电磁超声全矩阵数据采集实验

被测管道中央预设了两个孔径为 7 mm 的通孔缺陷(约为 $1/3$ 检测导波的波长),如图 15(a)所示。将研制的电磁超声传感器均匀布置在管道一端的外表面,各传感器之间的中心距为 27.48 mm,传感器的后沿与管道端面对齐,尽可能减少端面反射的激励波对成像结果的影响。实际检测现场图如图 13 所示。

在上位机中将激励频率设置为 153 kHz,激励波形设置为五周期汉宁窗调制的正弦信号,激励通道设置为 16 通道依次激励,采样率为 25 MHz,采样长度设置为 1 310.72 μs ,完成初始设置后进行全矩阵数据采集。其中 5 通道激励后 16 个通道接收的信号如图 14 所示。

电磁超声传感器在管道表面产生的其他模式导波幅值不高,激励模式较为纯净。但是由于传感器换能效率较低,导致回波幅值较小,且受到电磁干扰影响,噪声较大,只能看出管道另一端的端面回波,无法分辨出缺陷回波。因此,需要对信号进行降噪处理,并应用 TFM 算法与 SCF 算法提高对管道中缺陷的分辨能力。

5.3 管道全聚焦成像

对采集到的全矩阵数据进行窄带滤波,并应用幅值全聚焦算法进行成像,成像分辨率设置为 1 mm,同时

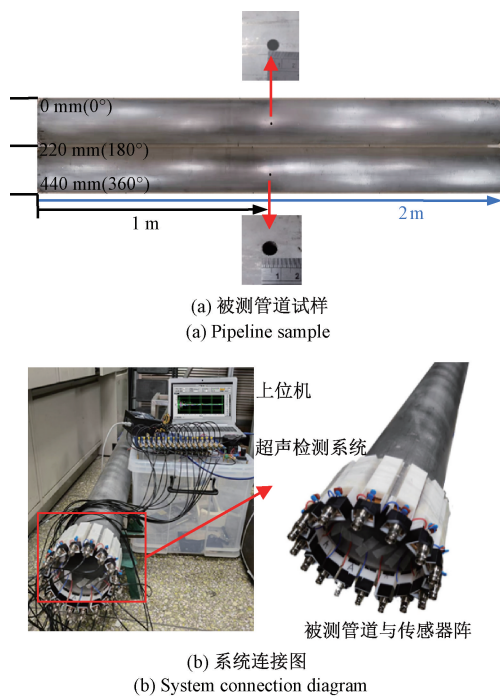


图 13 检测实验现场图

Fig. 13 Test experiment site photos

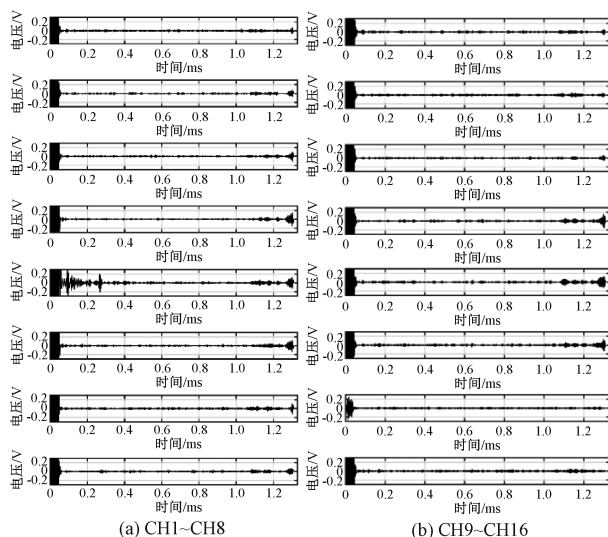


图 14 第 5 通道激励后 16 个通道接收到的波形

Fig. 14 Waveforms received by 16 channels after excitation by CH5

对成型结果进行去除噪声伪像,成像结果如图 15 所示。

从全聚焦成像的结果(白圈为缺陷实际位置)可以看出,管道试样中设置的两个通孔型缺陷均被检出,且缺陷的位置信息与管道试样中缺陷位置基本一致。但是成像结果中的缺陷图像幅值不够明显,缺陷区域整体有偏移,不利于缺陷的定位与区分,且成像结果中存在伪像,

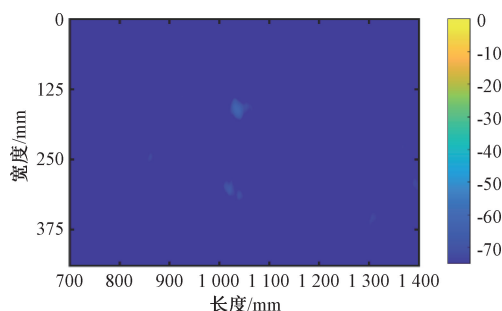


图 15 管道 16 通道滤波后全聚焦成像结果

Fig. 15 Results of pipeline 16-channel TFM imaging

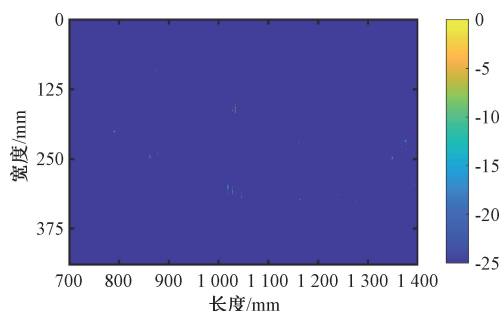


图 17 时间校正后的极性一致成像结果

Fig. 17 Time-corrected post-total focus with polarity-consistent imaging results

因此幅值全聚焦成像的方法依然不是最佳的成像方式,但其缺陷成像与定位能力也给应用其他算法提供了参考。

5.4 管道相位一致成像

针对 5.3 节采集到的管道全矩阵数据,先进行窄带滤波去噪,再应用极性一致成像算法进行处理,成像分辨率设置为 1 mm,将成像结果进行去除杂波干扰导致的伪像,可以得到效果更好的成像结果,如图 16 所示。

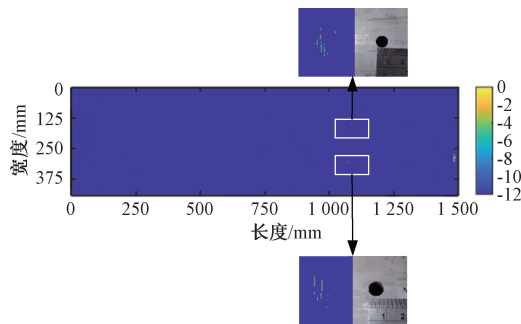


图 16 管道 16 通道滤波后极性一致成像结果

Fig. 16 Pipeline 16-channel filtered SCF imaging results

但是从成像结果来看,缺陷的位置与实际试样中缺陷的位置存在一定的误差,特别是缺陷部分会有两个重合的极值点。这主要是由于 EMAT 传感器并不是单向激励,在管道表面产生双向的激励波,遇到缺陷后会产生两个带有时间差的反射波峰。经过时间校准后的缺陷成像图如图 17 所示,将激励起始时刻修正为激励始波的峰值点后,缺陷位置相对误差有所减小,轴向误差小于 1.5%,定位更加精确。

6 结 论

本研究采用准 $T(0,1)$ 模态导波在金属管道中进行聚焦成像检测,为实现这一目标,开发了一种多通道电磁超声检测系统,该系统具备大功率电磁超声传感器激励

和全聚焦检测功能。此外,利用了极性一致成像的聚焦成像法,该方法具备高分辨率和高对比度的优势。同时,对回波信号进行时间校正进一步提高了缺陷定位的准确性。最终,金属管道上的通孔缺陷纵向定位误差可控制在 1.5% 以下,为实现管道阵列电磁超声传感器检测提供了一套高性能、便捷的检测系统。但仍需进一步根据导波激励原理,考虑抑制导波激发时其他模态的干扰,提高导波激发时模态的单一性,从而提高回波信号的信噪比,优化成像结果。

参考文献

- [1] 王晓娟,秦晨,刘君. 管道点蚀检测的导波仿真优化研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 166-174.
WANG X J, QIN CH, LIU J. Study on the simulation optimization of guided waves for the inspection of the pitting in pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 166-174.
- [2] 罗嵘,孙杰,王振,等. 超声导波-电磁超声组合技术在油气管道的腐蚀检测应用[J]. 无损探伤, 2023, 47(5): 42-44, 48.
LUO R, SUN J, WANG ZH, et al. Application of ultrasonic guided wave and electromagnetic ultrasonic combined technology in corrosion detection of oil and gas pipeline[J]. NDT, 2023, 47(5): 42-44, 48.
- [3] 谢志峥,王衍学,王一. 变温环境下充水管道导波监测的复合误差补偿方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(8): 173-181.
XIE ZH ZH, WANG Y X, WANG Y. Composite error compensation for guided wave monitoring of water-filled pipelines in variable temperature environment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(8): 173-181.
- [4] 何存富,郑明方,吕炎,等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8):

- 1713-1735.
- HE C F, ZHENG M F, LYU Y, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1713-1735.
- [5] 李文涛, 周正干. 一种复杂结构件圆柱面扩散焊缝阵列超声检测方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 1-7.
- LI W T, ZHOU ZH G. Ultrasonic array detection method on cylindrical surface diffusion weld of complex structural parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(22): 1-7.
- [6] 吕灿, 陈世利, 刘洋, 等. 手持式超声多通道系统设计与导波成像技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(11): 33-41.
- LYU C, CHEN SH L, LIU Y, et al. Design of hand-held multi-channel ultrasonic system and applications to ultrasonic guided wave imaging[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(11): 33-41.
- [7] NIU X, TEE K F, MARQUES H R. Superposition model of mode shapes composed of travelling torsional guided waves excited by multiple circular transducer arrays in pipes[J]. Ultrasonics, 2021, 116: 106507.
- [8] WANG Z, HUANG S, SHEN G, et al. High resolution tomography of pipeline using multi-helical Lamb wave based on compressed sensing [J]. Construction and Building Materials, 2022, 317: 125628.
- [9] WANG X, GAO H, ZHAO K, et al. Time-frequency characteristics of longitudinal modes in symmetric mode conversion for defect characterization in guided waves-based pipeline inspection[J]. NDT & E International, 2021, 122: 102490.
- [10] 王松浩, 胡芷逸, 张应红, 等. 超声导波管道缺陷定位方法研究[J]. 应用声学, 2022, 41(4): 558-567.
- WANG S H, HU ZH Y, ZHANG Y H, et al. Ultrasonic guided waves for defect location in pipeline[J]. Journal of Applied Acoustics, 2022, 41(4): 558-567.
- [11] 田劲坤, 王俊杰, 史明澄. 管道电磁超声周向导波内检测系统研制[J]. 仪表技术与传感器, 2023(8): 44-48, 60.
- TIAN SH K, WANG J J, SHI M CH. Development of pipeline electromagnetic ultrasonic circumferential guided wave internal inspection system [J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(8): 44-48, 60.
- [12] 黄松岭, 王哲, 王坤, 等. 管道电磁超声导波技术及其应用研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 1-12.
- HUANG S L, WANG ZH, WANG K, et al. Review on advances of pipe electromagnetic ultrasonic guided waves technology and its application [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 1-12.
- [13] 杨理践, 张佳, 邢燕好. 一种管道中 T(0,1) 模态单向电磁超声换能器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 98-106.
- YANG L J, ZHANG J, XING Y H. A unidirectional T(0,1) mode electromagnetic acoustic transducer in pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 98-106.
- [14] 郑浩, 周丽婷, 王湘明, 等. 电磁超声检测风机叶片缺陷的有限元仿真研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(23): 24-29.
- ZHENG H, ZHOU L T, WANG X M, et al. Finite element simulation study on electromagnetic ultrasonic detection of wind turbine blade [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(23): 24-29.
- [15] WANG S, LI C, MA X, et al. Broadband torsional guided wave magnetostrictive patch transducer with circumferential alternating permanent magnet array for structural health monitoring [J]. Ultrasonics, 2022, 125: 106805.
- [16] THON A, PAINCHAUD-APRIL G, LE DUFF A, et al. Optimization of a Lorentz forces EMAT for the reconstruction of the circumferential thickness profile of a steel pipe using high order shear horizontal modes[J]. NDT & E International, 2022, 128: 102631.
- [17] 周进节, 郑阳, 张宗健, 等. 基于电磁超声换能器阵列的管道螺旋导波传播规律研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 38-46.
- ZHOU J J, ZHENG Y, ZHANG Z J, et al. Helical mode guided waves in pipe observed by electromagnetic acoustic transducer array [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 38-46.
- [18] ZHANG M K, FAN G P, ZHU W F, et al. Multi-defect detection based on ultrasonic Lamb wave sign phase coherence factor imaging method [J]. Insight Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2021, 63(11): 659-666.
- [19] KUBRUSLY A C, KANG L, DIXON S. Unidirectional shear horizontal wave generation with side-shifted periodic permanent magnets electromagnetic acoustic transducer[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and

Frequency Control, 2020, 12:3027246.

- [20] MIAO H, LI F. Shear horizontal wave transducers for structural health monitoring and nondestructive testing: A review[J]. Ultrasonics, 2021, 114: 106355.

作者简介



刘轩, 2021 年于北京工业大学获得学士学位, 现为北京工业大学硕士研究生, 主要研究方向为超声导波检测技术。

E-mail: liu_xuan@emails.bjut.edu.cn

Liu Xuan received his B. Sc. degree from Beijing University of Technology in 2021. Now

he is a M. Sc. candidate at Beijing University of Technology. His main research interest includes ultrasonic guided wave detection technology.



吕炎(通信作者), 2008 年于北京航空航天大学获得学士学位, 2014 年于北京工业大学机械工获得博士学位, 现为北京工业大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为超声无损检测技术及系统研发、智能反演表征方法以及锂离子动力电池声学检测技术。

E-mail: lvyang@bjut.edu.cn

Lyu Yan(Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beihang University in 2008 and Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2014. Now he is a professor and Ph. D. supervisor at Beijing University of Technology. His main research interests include research and development of ultrasonic NDT technology and systems, intelligent inversion representation method and lithium-ion battery acoustic detection technology.