

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006954

一种管道中 $T(0,1)$ 模态单向电磁超声换能器*

杨理践, 张 佳, 邢燕好, 高松巍, 赵 璐

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘 要:为了准确判定管道中缺陷位置且减少回波信号复杂程度,提出一种管道中单向传播的电磁超声换能器结构。根据电磁超声换能器理论,建立磁场、位移、超声波叠加数学模型,并对单向电磁超声换能器波动位移进行有限元仿真分析;实验采用双线圈激励方法对 $T(0,1)$ 模态导波的传播强度进行控制。结果表明:换能器相邻导线间距为 $\lambda/4$,且延迟时间为 $T/4$ 时,减弱侧回波信号幅值近乎为零;增强侧回波信号幅值显著增强,与传统换能器产生的声波强度的相对灵敏度为 5.88 dB。单向 $T(0,1)$ 模态电磁超声换能器实现了传播强度与方向的控制,提高了检测信号的信噪比,为缺陷方位的精准识别提供了理论依据,为管道检测工程应用提供准确的缺陷位置信息。

关键词:管道;单向传播;电磁超声换能器; $T(0,1)$ 模态;检测

中图分类号: TB553 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.99

A unidirectional $T(0,1)$ mode electromagnetic acoustic transducer in pipeline

Yang Lijian, Zhang Jia, Xing Yanhao, Gao Songwei, Zhao Lu

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to accurately determine the location of the defects in pipeline and reduce the complexity of echo signal, an electromagnetic acoustic transducer structure with unidirectional propagation in the pipeline is proposed. According to the theory of electromagnetic acoustic transducer, the mathematical models of the magnetic field, displacement and ultrasonic superposition were established, and the finite element simulation analysis of wave fluctuation displacement of unidirectional electromagnetic acoustic transducer was carried out. In the experiment, the double coil excitation method was used to control the propagation intensity of $T(0,1)$ mode guided wave. The results show that when the distance between adjacent wires of the transducer is $\lambda/4$ and the delay time is $T/4$, the amplitude of echo signal on the weakened side is almost zero. The amplitude of the echo signal on the enhanced side is significantly enhanced, and the relative sensitivity to the intensity of the acoustic wave generated by the traditional transducer is 5.88 dB. The unidirectional $T(0,1)$ mode electromagnetic acoustic transducer realizes the control of propagation intensity and direction, improves the signal-to-noise ratio of detection signal, provides theoretical basis for accurate identification of defect orientation, and provides accurate defect location information for pipeline detection engineering application.

Keywords: pipeline; unidirectional propagation; electromagnetic acoustic transducer; $T(0,1)$ mode; detection

0 引 言

电磁超声换能器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 是一种非接触、高效、设计灵活的传感器,可方便地激发各种类型的超声波,能够快速实现缺陷的在线检测^[1-2]。由于 EMAT 激励导波的模态复杂,具有频散、多

模态、双向传播等特点,因此管道缺陷检测时,双向传播增加了检测信号分析复杂程度,难以实现缺陷准确定位,从而影响缺陷判定结果^[3-4],因此单向 EMAT 的研究具有重要意义。

国内外对激发单向超声导波 EMAT 的研究较少,多为在某一方向或某一点的点聚焦研究。刘素贞等^[5]针对非铁磁性材料铝板中的单向表面波微小缺陷检测

收稿日期:2020-09-27 Received Date:2020-09-27

* 基金项目:辽宁省教育厅重点项目(201744115)资助

进行研究,分析反射系数与裂纹深度关系,为缺陷量化提供了指导依据。Takishita 等^[6]利用线源 SV 波原理,提出了基于回折形线圈的剪切垂直波点聚焦电磁超声换能器,使得所有激发的垂直剪切波相位在一个焦点处聚焦,并对聚焦区进行了实验评估,证实了该换能器焦距尺寸足够小,可实现狭缝缺陷的检测,提高了检测灵敏度,实现了换能器的单向点聚焦控制。Thring 等^[7]提出了一种提高分辨率的聚焦电磁超声换能器,通过激光测振法和有限元模型对聚焦特性和孔径角效应进行了分析,表明聚焦 EMAT 具有良好的信噪比,可用于特定方向的声场聚焦检测。Thring 等^[8]提出了一种双线圈结构的瑞利波 EMAT,采用几何聚焦提高信号强度和表面缺陷检测精度,实现声束范围内一定方向的表面缺陷检测。Nakamura 等^[9]提出了弧形变间距的垂直剪切波点聚焦电磁超声换能器,在一个相位焦点处累积产生 SV 波,提高了缺陷检测能力,在管道腐蚀、裂纹的非接触检测中效果明显。Jia 等^[10-11]提出变间距同心结构的点聚焦回折形线圈 EMAT,将超声波集中到一个点,并通过与驱动频率相关的波模式控制驱动频率,实现波形的控制。Wang 等^[12]基于传统回折形线圈 EMAT,提出不同聚焦方向的换能器结构,有限元模拟了提出换能器声波的指向性,并进行实验测试,结果与模拟结果吻合。Zhang 等^[13]提出一种基于磁致伸缩原理的 SH0-EMAT,对换能器工作参数进行了理论分析,实现板中声波方向可控,且一致性较高,可精确的控制方向。

针对缺陷信号的识别定位困难的问题,基于常规电磁超声导波换能器检测信号双向传播研究,提出了提高缺陷识别与定位能力的单向 T(0,1) 模态电磁超声导波换能器(unidirectional T(0,1) mode electromagnetic acoustic transducer, UT-EMAT)结构。建立了铁磁性材料中换能器的磁场数学模型、位移数学模型与波叠加数学模型;对 UT-EMAT 的多物理场进行了有限元建模和仿真分析,验证了该换能器激励超声波位移的单向性;实验系统对设计的 UT-EMAT 进行了参数特性实验,并与常规 EMAT 进行了方向控制对比实验,验证了 UT-EMAT 检测信号易于识别的可行性,提高了管道检测的效率。

1 EMAT 原理

EMAT 由永磁铁、激励线圈和被测工件 3 部分组成,其换能原理如图 1 所示。

铁磁性材料中,EMAT 原理中包含电、磁、力、声等物理场相互转换,其可由麦克斯韦方程组表示为^[1-2,14-15]:

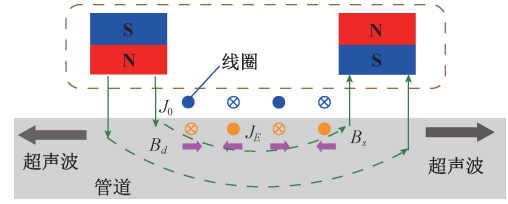


图 1 EMAT 原理

Fig. 1 EMAT principle

$$\begin{cases} \nabla \times H_d = J_0 \\ B_d = \mu_m H_d \\ \nabla \times E_E = -\frac{\partial B_d}{\partial t} \\ J_E = \gamma E_E \end{cases} \quad (1)$$

式中: ∇ 为哈密算子; H_d 为交变磁场强度; B_d 为交变磁感应强度; J_0 为激励电流密度; μ_m 为相对磁导率; γ 为电导率; E_E 为涡流电场强度; J_E 为涡流电流密度。

式(1)中: 交变磁感应强度与哈密算子、激励线圈密度、相对磁导率、交变磁场等参数有关。受上述磁场关系影响,铁磁性材料中,被测工件中质点受到磁致伸缩力 f_{MS} 、洛伦兹力 f_L 、磁化力 f_M ,从而产生波动位移^[16-18]。即 EMAT 中,磁场对线圈产生影响,产生波动位移,波动位移的叠加实现超声波沿某一方向的传播。因此分别建立铁磁性材料中磁场数学模型、位移数学模型与波叠加数学模型。

2 磁场-位移-波叠加数学模型

2.1 磁场数学模型

EMAT 中,永磁铁固定,静态偏置磁场不变,工件中受静态磁场强度影响的作用力保持不变,激励电流与动态磁感应强度影响工件中受动态磁场强度影响的作用力。EMAT 回折形线圈中,以相邻的导线为数学分析对象。由于回折形线圈中通电流为闭合回路,移动 l_{BC} 端线,使得磁场模型中导线 l_{AB} 、 l_{BC} 、 l_{CD} 、 l_{DA} 构成等效闭合回路。通入瞬时有效电流 dI_m ,此时导线 l_{AB} 中为瞬时电流。建立工件中磁场数学模型如图 2 所示。

图 2 中,定义线圈 x 轴方向长度为 $2a$, y 轴方向长度为 $2b$,线圈中心 xoy 坐标系, A 点坐标 $(a, b, 0)$, B 点坐标 $(a, -b, 0)$, C 点坐标 $(-a, -b, 0)$, D 点坐标 $(-a, b, 0)$ 。

毕奥-萨伐尔定律可以得出, l_{AB} 在 P 点处的磁感应强度为^[1-2]:

$$\vec{B}^{AB} = \frac{\mu_0 I_m}{4\pi} \int_{AB} \frac{d\vec{l} \times \vec{QP}}{|\vec{QP}|^3} = \frac{\mu_0 I_m}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\pi-\theta_2} \frac{\sin\theta dl}{|\vec{QP}|^2} \quad (2)$$

式中: dl 为线电流; θ_1 为 AP 与 l_{AB} 之间的夹角; θ_2 为 BP 与 BA 之间的夹角。

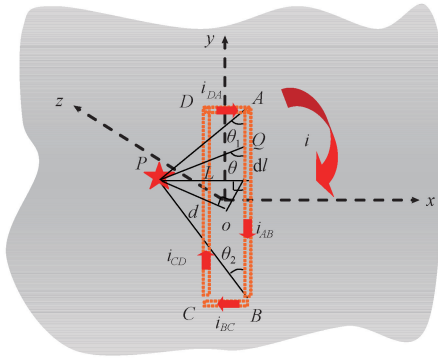


图2 磁场数学模型

Fig. 2 Mathematical model of magnetic field

根据微积分原理,对瞬时静态磁感应强度进行微积分运算,得到叠加的动态磁感应强度为:

$$\overline{B_d^{AB}} = \int_{i_{AB}} \frac{\mu_0 dI_m \times dt}{4\pi} \int_{l_{AB}} \frac{d\vec{l} \times \overrightarrow{QP}}{|QP|^3} = \int_{i_{AB}} \frac{\mu_0 dI_m}{4\pi |QP|^2} \int_{\theta_1}^{\pi-\theta_2} \sin\theta d\theta dt \quad (3)$$

式中:dt为瞬时时间间隔; θ 为QP与dl之间的夹角。

由数学模型中三角函数关系,则有:

$$\overline{B_d^{AB}} = \int_{i_{AB}} \frac{\mu_0 dI_m}{4\pi L} \int_{\theta_1}^{\pi-\theta_2} \sin\theta d\theta dt = \frac{\mu_0 I_m}{4\pi L} (\cos\theta_2 + \cos\theta_1) \quad (4)$$

式中:d为P点所在的xoy平面到导线 l_{AB} 的距离。

上式可知,动态磁感应强度大小受控于线圈自身参数的影响。线圈参数一定的情况下,超声波产生振动,形成波动位移。由此进一步推导磁感应强度对EMAT中波动位移影响。

2.2 位移数学模型

电磁超声波动位移是在静态磁场与交变磁场作用下,由 f_{MS} 、 f_L 、 f_M 3种力共同作用产生。磁致伸缩力波动位移是由交变磁场作用的结果,静磁场仅对波动位移提供偏移量;洛伦兹力、磁化力波动位移是由静磁场和交变磁场同时作用的结果。

针对3种力中静磁场和交变磁场主导作用的差异性,分别建立磁致伸缩力作用下位移模型,洛伦兹力、磁化力作用下位移模型,并对两种位移模型进行分析。

1) 磁致伸缩力作用下位移模型

磁致伸缩力作用下,管道上任意的体积元为 $\rho dx dy dz$,则体积元运动方程为:

$$\rho \frac{\partial^2 u_{MS}}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \quad (5)$$

式中: u_{MS} 为磁致伸缩力作用下超声波位移; σ 为作用在体积元 $\rho dx dy dz$ 上的总应力。

则应力与应变关系为:

$$\begin{cases} \sigma = E \frac{\partial u_{MS}}{\partial x} - \lambda_{MS} B \\ H = \frac{1}{\mu_r} B - 4\pi \lambda_{MS} \frac{\partial u_{MS}}{\partial x} \end{cases} \quad (6)$$

式中: B 为总磁感应强度,为静磁感应强度 B_s 与交变磁感应强度 B_d 之和; μ_r 为可逆磁导率; λ_{MS} 为磁致伸缩系数; E 为杨氏模量, $\partial u_{MS}/\partial x$ 为应变; H 为总磁场强度。

超声波在管道中传播时产生连续的谐波,设位移 $u_{MS}(k, x, t) = u_{MS}(k, x) e^{i\omega t}$,磁场强度 $H(x, t) = H(x) e^{i\omega t}$,则有:

$$\frac{d^2 u_{MS}}{dx^2} + k^2 u_{MS} = \frac{\mu_r \lambda_{MS}}{E} \frac{dH}{dx} \quad (7)$$

式中: $k = \omega/v$,为波数; $v = (E/\rho)^{1/2}$,为超声波速度。

上式为二阶微分方程,其一般解为:

$$u_{MS}(k, x) = C_1 e^{-ikx} + C_2 e^{ikx} +$$

$$\frac{\lambda_{MS} \mu_r}{2ikE} \int_0^x \frac{dH}{d\xi} [e^{ik(x-\xi)} - e^{-ik(x-\xi)}] d\xi \quad (8)$$

式中: C_1 、 C_2 为系数,则接收EMAT表达式可进一步表示为:

$$u_{MS} = \frac{\lambda_{MS}}{2E\mu_0} \int_0^l B(\xi) e^{ik(\xi-x+\omega t)} d\xi \quad (9)$$

由式(9)可知,磁致伸缩力作用下的波动位移是磁感应强度的函数。

2) 洛伦兹力、磁化力作用下位移模型

f_L 、 f_M 的表达式分别为:

$$f_L = J_e \times (B_s + B_d) \quad (10)$$

$$f_M = \mu_0 (\nabla H) \cdot M = \mu_0 (\nabla (H_d + H_s)) \cdot M \quad (11)$$

式中: J_e 为感生涡流密度; M 为磁化强度; μ_0 为真空中磁导率; H_s 为静磁场强度; H_d 为交变磁场强度。

则洛伦兹力与磁化力作用下位移表达式为:

$$\rho \frac{\partial^2 u_{L,M}}{\partial t^2} = (\lambda_m + 2\mu_m) \nabla (\nabla \cdot u_2) - \mu_m \nabla \times \nabla \times u_{L,M} + (f_L + f_M) \quad (12)$$

式中: λ_m 、 μ_m 为拉梅常数; $u_{L,M}$ 为洛伦兹力与磁化力作用下超声波位移; ρ 为待测工件密度。

求解上述方程:

$$u_{L,M} = \iint \left\{ \frac{1}{\rho} [(\lambda_m + 2\mu_m) \nabla (\nabla \cdot u_2) - \mu_m \nabla \times \nabla \times u_{L,M}] + \left[J_e \times (B_s + B_d) + \nabla \frac{(B_s + B_d) \cdot M}{\mu_r} \right] \right\} dt \quad (13)$$

由式(13)可知,洛伦兹力与磁化力作用下的超声波位移也为磁感应强度的函数。

由磁致伸缩力、洛伦兹力、磁化力三者的位移数学模型可知,铁磁性材料中EMAT波动位移幅值是关于磁感应强度的数学关系。为进一步分析控制EMAT产生超声波波动位移的强度与方向,建立波叠加的数学模型,对波动位移进行分析。

2.3 波叠加数学模型

EMAT 产生的超声波在传播过程中,产生声波的数学函数为:

$$y = u \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi \right] \quad (14)$$

式中: x 为平衡位移; y 为 x 轴上质点离开平衡位置的位移; u 为 EMAT 中 u_{MS} 与 $u_{L,M}$ 的矢量和; $\omega = 2\pi/T$; T 为周期; t 为时间; v 为波速; φ 为相位。

相同频率与相位的 C1-EMAT 与 C2-EMAT 中,两列波传播时,叠加产生的波动位移方程 y 表示为:

$$y = y_{C1} + y_{C2} = u_{C1} \cos \left[\omega \left(-t - \frac{x}{v} \right) + \varphi \right] + u_{C2} \cos \left[\omega \left(-t - \Delta t - \frac{x + \Delta x}{v} \right) + \varphi \right] \quad (15)$$

式中: y_{C1} 为 C1-EMAT 中 x 轴上质点离开平衡位置的位移; y_{C2} 为 C2-EMAT 中 x 轴上质点离开平衡位置的位移; u_{C1} 为 C1-EMAT 中 u_{MS} 与 $u_{L,M}$ 的矢量和; u_{C2} 为 C2-EMAT 中 u_{MS} 与 $u_{L,M}$ 的矢量和; Δt 为 C2-EMAT 中激励电流延迟 C1-EMAT 中激励电流的时间; Δx 为 C2-EMAT 中线圈导线与 C1-EMAT 中线圈导线间距。

若向左传播的超声波幅值叠加后为 0,则需令: $u_{C1} = u_{C2}$,且 C1-EMAT 与 C2-EMAT 激励线圈相位差为 $nT + T/2$ (n 为周期数),但为了尽量缩小 C1-EMAT 与 C2-EMAT 间距,防止多周期的影响,因此令二者相位差为 $T/2$ 。则上式可变为:

$$\omega \left(-t - \Delta t - \frac{x + \Delta x}{v} \right) - \omega \left(-t - \frac{x}{v} \right) = \omega \times \frac{T}{2} \quad (16)$$

上式整理可得:

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{\lambda}{4} \\ \Delta t = \frac{T}{4} \end{cases} \quad (17)$$

式中: λ 为波长。

上式可知,当 C1-EMAT 与 C2-EMAT 中相邻导线间距为 $\lambda/4$,且 C2-EMAT 中激励时间延迟 C1-EMAT 中激励时间 $T/4$ 时,向左传播的超声波幅值叠加为 0。

由于 EMAT 同时向工件两侧传播超声波,当向左传播的超声波叠加为 0 时,向右传播的超声波时间延迟表达式为:

$$\omega \left(t - \Delta t - \frac{x - \Delta x}{v} \right) - \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = 0 \quad (18)$$

式(18)计算为 0,则两列波沿右侧传播相位相同,即叠加幅值为两者幅值之和。

2.4 UT-EMAT 设计

基于上述磁场数学模型、位移数学模型以及波的叠加数学模型结果,设计如下图所示的 UT-EMAT。原理如

图 3 所示。

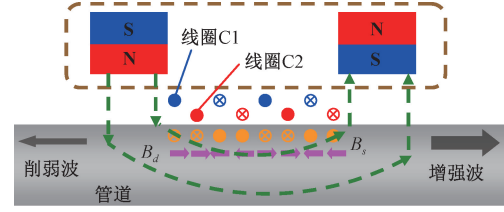


图 3 UT-EMAT 原理图

Fig. 3 UT-EMAT principle diagram

图中,永磁铁提供水平方向磁场;线圈由两个回折形线圈组成,组合后线圈的相邻导线间距为 $\lambda/4$,线圈 C2 中电流激励时间延迟线圈 C1 中激励电流时间 $T/4$ 。若更改增强波和削弱波的方向,则更改线圈 C2 与线圈 C1 中的延迟时间,即令线圈 C1 中电流激励时间延迟线圈 C2 中激励电流时间 $T/4$ 。

当 $\Delta x = \lambda/4$ 时,一个周期内,UT-EMAT 中,线圈 C1 和线圈 C2 延迟时间差分别为 $T/4$ 、 $T/2$ 、 $3T/4$ 、 T 时,UT-EMAT 向两侧传播的超声波位移如图 4 所示。

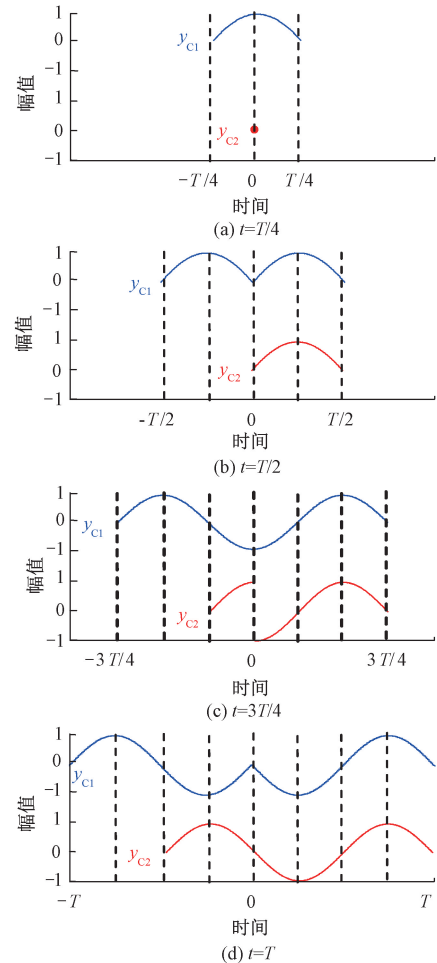


图 4 C1-EMAT 与 C2-EMAT 的叠加波形

Fig. 4 Superposition waveform of C1-EMAT and C2-EMAT

经过1个周期后,C1-EMAT和C2-EMAT中产生的超声波波形叠加,形成新的超声波,得到的单向导波波形如图5所示。

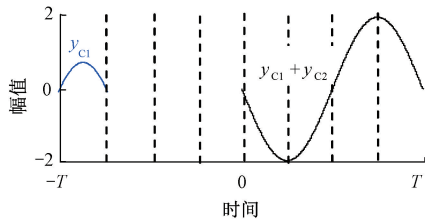


图5 1周期后得到的单向导波

Fig. 5 The unidirectional guided wave obtained after 1 cycle

图5中,当双激励线圈工作时,为实现右侧单向传播,即超声波沿左侧传播的位移强度叠加为零,其工作过程描述如下。因C1线圈位于左侧,为实现双线圈产生的超声波沿右侧方向传播,首先对C1线圈激励,将该时刻定义为零时刻,即 $t=0$ 。线圈C1作用下产生沿左右两侧同时传播的超声波动,向右侧传播 $\lambda/4$ 声程,即C2线圈正下方时,时刻为 $t=T/4$,该瞬时时刻对C2线圈激励,使其产生与C1线圈同相位的超声波动。沿右侧传播时,因C1与C2线圈产生超声波动为同相位,则其合振动增强;沿左侧传播时,因C1与C2线圈产生超声波动为反相位,则其合振动减弱。实际传播过程中,两列波在叠加位置处的幅度存在差异,或相位无法准确相同,因此合振动无法减弱为零或增强为最大。通过对距离为 $\lambda/4$ 的双激励线圈激励时间参数及幅值的控制,可以实现电磁超声导波的单向激励,提高信噪比,降低回波信号复杂程度。

3 UT-EMAT 有限元仿真

为验证 UT-EMAT 单向传播的性质,建立有限元仿真模型,如图6所示。

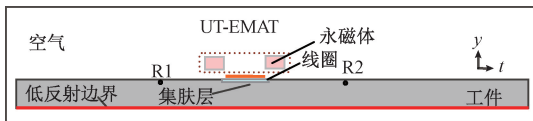


图6 有限元模型

Fig. 6 Finite element model

模型中,钕铁硼永磁体尺寸为 50×30 mm,剩磁为1.4 T。静磁场方向为水平方向。工件长度为300 mm、工件厚度为0.7 mm,杨氏模量为210 GPa,泊松比为0.3,密度为 7800 kg/m^3 。UT-EMAT回折形线圈导线为8根。激励信号频率为0.5 MHz,激励线圈C1与激励线圈C2中电流周期为 $2 \mu\text{s}$ 。有限元模型中,R1与R2位置处,线圈C1与线圈C2延迟时间差分别为0、 $T/8$ 、 $T/4$ 、

$3T/8$ 、 $T/2$ 、 $5T/8$ 、 $3T/4$ 、 $7T/8$ 、 T 时,工件中超声波位移变化情况如图7所示。

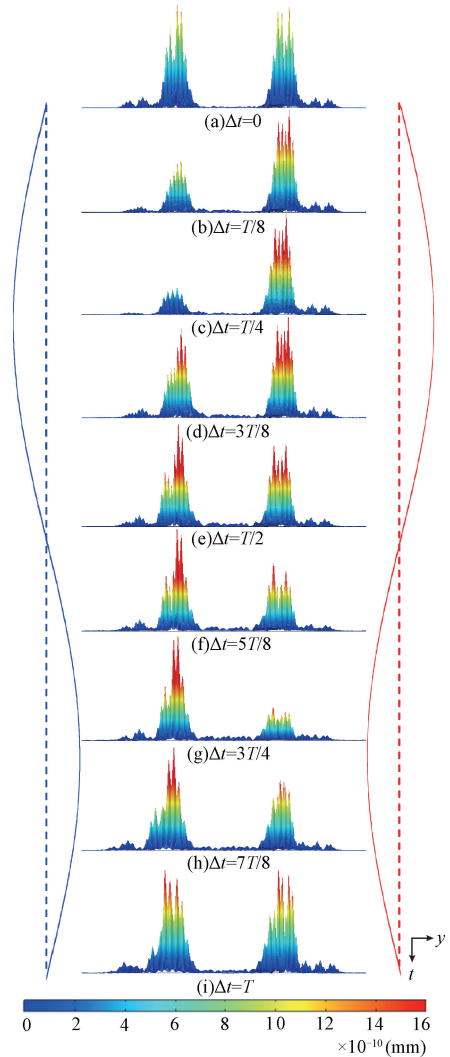


图7 超声波位移图

Fig. 7 Ultrasonic displacement diagram

图7(a)中,线圈C1与线圈C2无延迟,此时R1与R2位置回波信号幅值相同;图7(b)中,线圈C2中电流激励时间延迟线圈C1中电流激励时间为 $T/8$,此时R1位置回波幅值开始减小,R2位置回波幅值开始增大;图7(c)中,线圈C2中电流激励时间延迟线圈C1中电流激励时间为 $T/4$,此时R1位置回波幅值最小,R2位置回波幅值最大;图7(d)中,线圈C2中电流激励时间延迟线圈C1中电流激励时间为 $3T/8$,此时R1位置回波幅值开始增大,R2位置回波幅值开始减小;图7(e)中,线圈C2中电流激励时间延迟线圈C1中电流激励时间为 $T/2$,此时R1位置回波幅值继续增大,R2位置回波幅值继续减小;图7(f)中,线圈C2中电流激励时间延迟线圈C1中电流激励时间为 $5T/8$,此时R1位置回波幅值进一步增

大, R2 位置回波幅值进一步减小; 图 7(g) 中, 线圈 C2 中电流激励时间延迟线圈 C1 中电流激励时间为 $3T/4$, 此时 R1 位置回波幅值达到左侧最大值, R2 位置回波幅值达到右侧最小值; 图 7(h) 中, 线圈 C2 中电流激励时间延迟线圈 C1 中电流激励时间为 $7T/8$, 此时 R1 位置回波幅值开始减小, R2 位置回波幅值开始增大; 图 7(i) 中, 线圈 C2 中电流激励时间延迟线圈 C1 中电流激励时间为 T , 此时 R1 位置和 R2 位置回波幅值相同。上述整个变化过程中, 增强侧回波位移变化过程与削弱侧回波位移变化过程呈现周期函数特征, 且两特征函数呈现反相变化。

UT-EMAT 模拟仿真结果表明, 当激励线圈 C2 中电流激励时间延迟线圈 C1 中电流激励时间为 $T/4$ 时, UT-EMAT 产生单向传播的超声导波, 向右传播的超声波位移幅值最大, 且向左侧传播的超声波位移几乎为零。为了进一步对提出的换能器结构进行验证, 进行实验研究与分析。

4 实验研究与分析

实验研究中, 采用收发分离检测方式。分别进行 UT-EMAT 线圈参数特性实验、常规 EMAT 与 UT-EMAT 方向控制对比实验。实验系统中, 永磁体整体几何尺寸为: 长 50 mm, 宽 50 mm, 高 30 mm; 管道几何尺寸为: 长 3 000 mm, 外径 110 mm, 内径 100 mm。实验系统框图如图 8 所示。

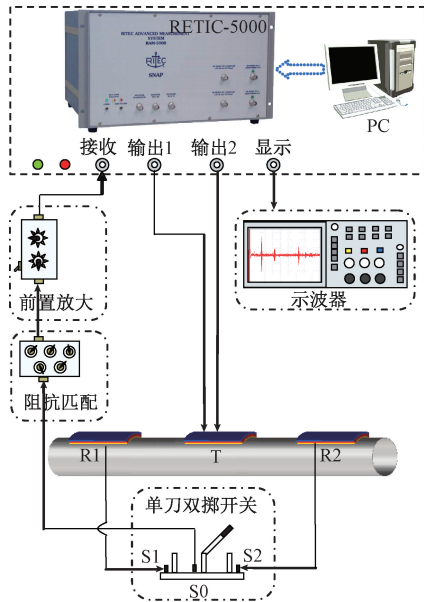


图 8 实验系统

Fig. 8 Experiment system

实验中, 激励换能器分别采用常规 EMAT 与 UT-EMAT, 接收换能器均采用常规 EMAT。RITEC-5000 产

生高频脉冲, 输出两路激励信号, 分别作用于 UT-EMAT 线圈 C1 与线圈 C2。接收 EMAT 采用单刀双掷开关形式, 分别在 R1、R2 位置接收。接收换能器将波动位移转化为电信号, 经阻抗匹配与前置放大后由 RITEC-RAM5000 接收, 示波器显示回波。经频率扫描, 确定 UC-EMAT 激励信号频率为 $f=0.50$ MHz。设置高通滤波器参数的截止频率为 0.1 MHz, 低通滤波器参数的截止频率为 20 MHz。

4.1 UT-EMAT 线圈参数特性实验

为验证 UT-EMAT 线圈参数性能, 分别进行延迟时间对回波幅值影响实验、C1-EMAT 与 C2-EMAT 不同幅值比回波影响实验、激励频率影响实验。实验结果如图 9 所示。

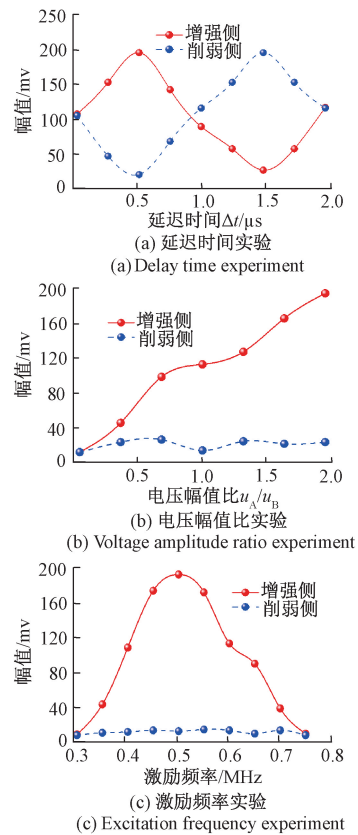


图 9 UT-EMAT 线圈参数特性

Fig. 9 Parameter properties of the UT-EMAT coil

图 9(a) 为延迟时间实验结果, 令线圈 C2 分别延迟线圈 C1 激励的时间为 0 、 $T/8$ 、 $T/4$ 、 $3T/8$ 、 $T/2$ 、 $5T/8$ 、 $6T/8$ 、 $7T/8$ 、 T , 激励换能器 T 位置不变, 接收换能器分别位于激励换能器两侧相同距离的 R1、R2 位置接收。图中, 接收换能器置于 UT-EMAT 增强侧 R2 处接收时, 回波信号幅值先逐渐增大, 在 $0.5 \mu\text{s}$ 处回波幅值最大, 后逐渐衰减, 在 $1.5 \mu\text{s}$ 处回波幅值最小, 后又逐渐增大, 变化过程呈现周期正弦波特征; R1 位置处回波幅值与 R2

位置处回波幅值变化趋势相反。图9(b)为电压幅值比实验,令C1-EMAT与C2-EMAT回波幅值作比,随着二者比值的增大,增强侧回波幅值逐渐增大,减弱侧回波幅值与二者比值几乎无关;但当二者比值为1时,减弱侧回波幅值最小,证明了理论的正确性。因此将二者输出电压设为一致,尽可能的削弱减弱侧回波信号,达到更好的方向控制。图9(c)为激励频率实验,频率变化范围为0.3~0.8 MHz,随着激励频率的增加,增强侧回波幅值逐渐增大,在0.5 MHz处回波幅值达到最大;随着激励频率进一步增加,增强侧回波幅值逐渐衰减为零;而减弱侧回波幅值与激励频率无关,幅值始终保持接近为零。

根据UT-EMAT线圈参数特性实验中得到的最佳参数设置,进行换能器方向控制实验,验证其在检测过程中的方向可控性与检测优势性。

4.2 方向控制实验

方向控制实验中,收、发换能器沿管道轴向对齐放置,分别进行常规EMAT与UT-EMAT方向控制对比实验,验证UT-EMAT单向可控的性质。激励换能器T置于管道中间位置,接收换能器R1与R2分别置于激励换能器T两侧,距离为1 000 mm。分别用线圈C1、线圈C2与永磁铁构成的常规EMAT与UT-EMAT作为激励换能器,令R1与R2分别进行接收,查看两侧回波信号。实验方案与检测回波分别如图10所示。

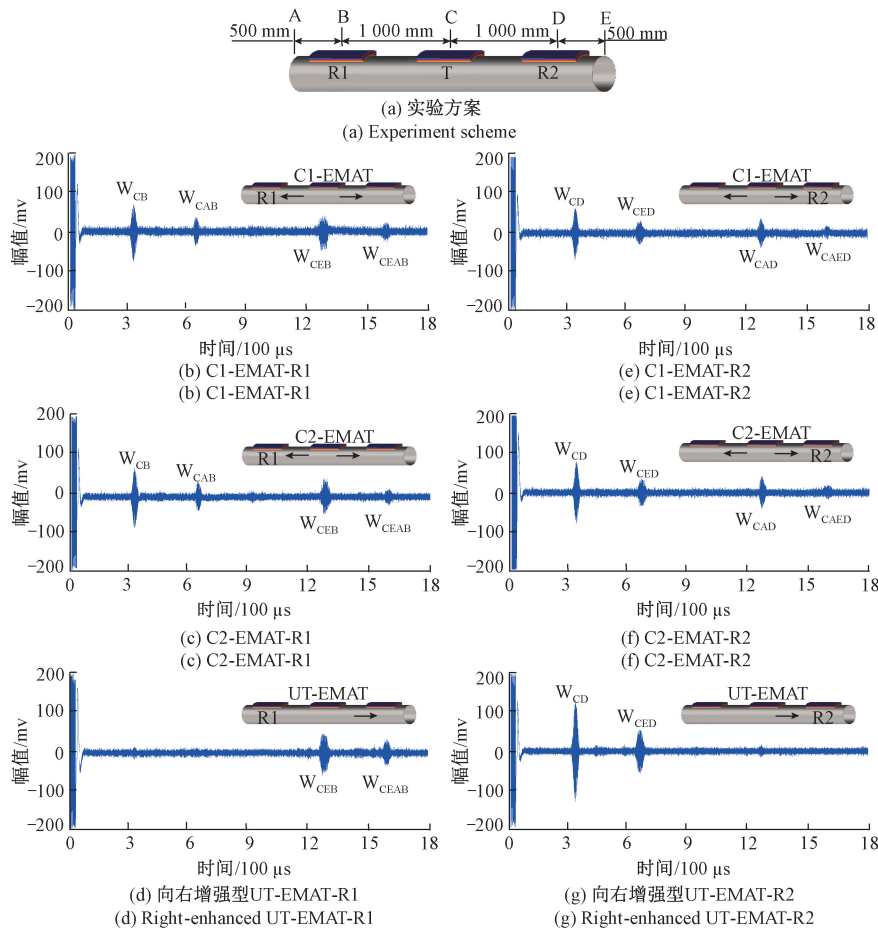


图10 方向控制实验方案与回波

Fig. 10 Direction control experiment scheme and the echoes

图10(a)为传播实验方案与收、发换能器分布图,点A、B、C、D、E为声程中的各个节点,记录声波传播经过的位置。图10(b)、(c)、(d)中,激励换能器分别为线圈C1-EMAT、线圈C2-EMAT、UT-EMAT;接收换能器均为R1。图10(e)、(f)、(g)中激励换能器分别为线圈C1-EMAT、线圈C2-EMAT、UT-EMAT,接收换能器均为R2。

图10(b)、(c)、(e)中: W_{CB} 为C点激励,B点接收的波; W_{CAB} 为C点激励,经过端面A,B点接收的波; W_{CEB} 为C点激励,经过端面E,B点接收的波; W_{CEAB} 为C点激励,经过端面E,再经过端面A,B点接收的波。图10(e)、(f)、(g)中: W_{CD} 为C点激励,D点接收的波; W_{CED} 为C点激励,经过端面E,D点接收的波; W_{CAD} 为C

点激励,经过端面A,D点接收的波; W_{CAED} 为C点激励,经过端面A,再经过端面E,D点接收的波。

图10(b)与(c)以及图10(e)与(f)对比可知,线圈C1-EMAT与线圈C2-EMAT传播性质相同;图10(b)与(e)以及图10(c)与(f)对比可知,常规EMAT向换能器向两侧同时传播超声波;图10(c)与(d)以及图10(f)与(g)对比可知,向右增强的UT-EMAT中回波信号幅值明显增强,且简化了回波信号;10(d)与(g)对比可知,UT-EMAT与接收换能器距离相同,但接收位置不同时,回波信号不同。

令UT-EMAT回波信号峰峰值为 $U_{UT-EMAT}$,常规EMAT回波信号峰峰值为 U_{EMAT} ,则UT-EMAT的传感器相对灵敏度为: $20\lg(U_{UT-EMAT}/U_{EMAT}) = 20\lg(246\text{ mV}/125\text{ mV}) = 20\lg(1.968) = 5.88\text{ dB}$ 。又根据上述实验中,激励换能器与接收换能器距离为1000 mm时,对应的回波信号时间为320 μs ,则波速为3125 m/s,对应轴向导波频散曲线关系与传播性质可知^[19-22],此时回波信号模态为T(0,1)。实际检测中,可根据检测工况选择向右增强UT-EMAT或向左增强UT-EMAT。

上述方向控制实验可知,UT-EMAT简化了接收回波信号的复杂程度,使其更加易于识别,通过回波信号可准确判定缺陷位置,并提高了回波信号信噪比。

5 结 论

针对管道中EMAT检测效率低,回波信号识别复杂的问题,设计一种UT-EMAT。通过对换能机理分析,分别建立磁场数学模型、位移数学模型、波叠加数学模型,得出UT-EMAT中两线圈声波位移叠加关系,通过调整激励延迟,实现UT-EMAT的单方向控制。研究结果表明:1)UT-EMAT声波位移单向传播性质满足建立的磁场数学模型-位移数学模型-波叠加数学模型理论,幅值部分数学模型表明幅值随着时间的推移呈指数逐渐衰减;2)设计的UT-EMAT减弱侧回波信号幅值近乎为零;增强侧回波信号幅值显著增强,与传统换能器结构声波幅值的比为5.88 dB;3)线圈导线间距和双激励延迟时间的参数关系为:相邻导线间距为 $\lambda/4$,且延迟时间为 $T/4$ 时单向控制效果最好;4)UT-EMAT在实际检测中应用性较好,提高了管道检测中识别与定位能力,降低了检测信号识别的复杂程度。

参考文献

[1] 杨理践,邢燕好,张佳,等. 电磁超声导波在管道中螺旋向传播的机理研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 60-69.
YANG L J, XING Y H, ZHANG J, et al. Research on spiral propagation mechanism of electromagnetic

ultrasonic guided wave in pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 60-69.
[2] 杨理践,邢燕好,张佳,等. 基于电磁超声导波的铝板裂纹缺陷检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 150-160.
YANG L J, XING Y H, ZHANG J, et al. Crack defect detection of aluminium plate based on electromagnetic ultrasonic guided wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 150-160.
[3] 赵佰秋,孟立新,于笑楠,等. 多通道超声的双向单程伪距测量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 174-180.
ZHAO B Q, MENG L X, YU X N, et al. Research on dual one-way pseudorange measurement of multi-channel ultrasound[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9): 174-180.
[4] 王晓娟,赵锴,郑毅,等. 管道纵向超声导波的对称模态转换特性分析[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 151-160.
WANG X J, ZHAO K, ZHENG Y, et al. Characteristics of symmetric mode conversion of longitudinal guided-wave modes in pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 151-160.
[5] 刘素贞,董硕,方正,等. 电磁超声单向表面波对铝板微小缺陷的检测[J]. 声学技术, 2019, 38(3): 290-295.
LIU S ZH, DONG SH, FANG ZH, et al. Tiny defect detection of aluminium plate electromagnetic ultrasonic unidirectional surface wave[J]. Technical Acoustics, 2019, 38(3): 290-295.
[6] TAKISHITA T, ASHIDA K, NAKAMURA, et al. Development of shear vertical-wave point-focusing electromagnetic acoustic transducer[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015(54): 07HC04.
[7] THRING C B, FAN R S, EDWARDS. Focused Rayleigh wave EMAT for characterization of surface-breaking defects[J]. NDT&E International, 2016(81): 20-27.
[8] THRING C B, FAN R S, EDWARDS. Multi-coil focused EMAT for characterisation of surface-breaking defects of arbitrary orientation[J]. NDT&E International, 2017(88): 1-7.
[9] NAKAMURA N, ASHIDA K, TAKISHITA T, et al. Inspection of stress corrosion cracking in welded stainless steel pipe using point-focusing electromagnetic-acoustic transducer[J]. NDT&E International, 2016(83): 88-93.
[10] JIA X J, OUYANG Q. Driving frequency dependent wave modes of point-focusing electromagnetic acoustic

- transducers[J]. Review of Scientific Instruments, 2018 (89): 085006.
- [11] JIA X J, OUYANG Q. Influence of aperture angles and design focal depths on the performance of point-focusing shear vertical wave electromagnetic acoustic transducers[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018(143): 2892.
- [12] WANG S J, SU R L, CHEN X Y, et al. Numerical and experimental analysis of unidirectional meander-line coil electromagnetic acoustic transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control, 2013, 60(12): 2657-2664.
- [13] ZHANG Y, HUANG S L, WANG S, et al. Direction-controllable electromagnetic acoustic transducer for SH waves in steel plate based on magnetostriction [J]. Progress in Electromagnetic Research M, 2016 (50): 151-160.
- [14] SUN H Y, HUANG S L, WANG Q, et al. Orthogonal optimal design method for point-focusing EMAT considering focal area dimensions [J]. Sensors and Actuators A, Physical, 2020(312): 112109.
- [15] LIU Z H, ZHAO X, LI J Q, et al. Obliquely incident EMAT for high-order lamb wave mode generation based on inclined static magnetic field [J]. NDT&E International, 2019(104): 124-134.
- [16] REN W P, XU K, DIXON S, et al. A study of magnetostriction mechanism of EMAT on low-carbon steel at high temperature [J]. NDT&E International, 2019 (101): 34-43.
- [17] ZHANG X D, LIU X CH, WU B, et al. An improved analytical model of the magnetostriction-based EMAT of SH0 mode guided wave in a ferromagnetic plate [J]. Ultrasonics, 2020(108): 106213.
- [18] WANG P, ZHANG Y, YAO E, et al. Method of measuring the mechanical properties of ferromagnetic materials based on magnetostrictive EMAT characteristic parameters[J]. Measurement, 2020(168): 108187.
- [19] KOODALIL D, BARNONCEL D, RAJAGOPAL P, et al. Detection of interfacial weakness in a lap-shear joint using shear horizontal guided wave [J]. NDT&E International, 2020(112): 102248.
- [20] PUTHUSSERI R, BALASUBRAMANIAM K. Influence of magnetostrictive strip size in the generation of L(0,2) and T(0,1) wave mode using magnetostrictive patch[J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2102(1): 050023.
- [21] SUN F, SUN Z G, CHEN Q, et al. Characteristics of SH0-wave converted to T(0,1)-wave based on a T-shaped plate wrapped around a pipe [J]. IEEE

Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 66(1): 129-137.

- [22] HUANG S L, SUN H Y, SHEN G T, et al. Characteristics of T(0,1) guided-wave point-focusing electromagnetic acoustic transducer for pipe inspection[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(6): 2895-2903.

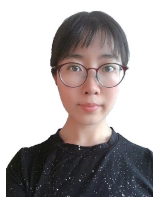
作者简介



杨理践, 1981 年于沈阳工业大学获得学士学位, 1984 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学教授, 主要研究方向为长输油气管道内检测技术及相关理论、无损检测技术。

E-mail: yanglijian888@163.com

Yang Lijian received his B. Sc. degree in 1981 from Shenyang University of Technology, received his M. Sc. degree in 1984 from Harbin Institute of Technology. Now, he is a professor in Shenyang University of Technology. His main research interest includes in-detection technology and related theory of long distance oil and gas pipeline, nondestructive testing technology.



张佳(通信作者), 2012 年于黑龙江科技大学获得学士学位, 2015 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学博士研究生, 主要研究方向为压电超声检测技术、电磁超声检测技术理论及应用。

E-mail: zhangjia0929@126.com

Zhang Jia (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 2012 from Heilongjiang University of Science and Technology, received her M. Sc. degree in 2015 from Shenyang University of Technology. Now, she is a doctoral candidate in Shenyang University of Technology. Her main research interest includes piezo ultrasonic detection technology, electromagnetic ultrasonic detection technology theory and application.



邢燕好, 2002 年于沈阳工业大学获得学士学位, 2005 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学讲师, 主要研究方向为压电超声检测技术和电磁超声检测技术相关理论及应用、无损检测设备设计与开发。

E-mail: xingyanhao@126.com

Xing Yanhao received his B. Sc. degree in 2002 and M. Sc. degree in 2005 both from Shenyang University of Technology. Now, he is a lecturer in Shenyang University of Technology. His main research interest includes piezo ultrasonic detection technology, electromagnetic ultrasonic detection technology and related theories, nondestructive testing equipment design and development.