

基于新型扭转导波 EMAT 的缺陷高灵敏度检测方法

刘登荣 毛丰晶

(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘 要: $T(0,1)$ 扭转导波因其具有非频散的特点,在管道缺陷检测中被广泛应用。本文提出了一种新型内插式扭转导波电磁超声传感器,它具有非接触、结构简单以及高信噪比的优点。该传感器主要由弧形线圈、跑道型永磁体和支撑骨架构成,基于 Wiedemann 效应在管道中产生扭转导波。首先利用数值模拟对传感器的轴向动态磁场和周向静态偏置磁场进行了仿真,验证了该传感器产生扭转导波的可行性,且研究了管道弯曲半径对扭转导波传播的影响。然后通过所提出的 $T(0,1)$ 扭转导波传感器并且结合频域-波数域分析方法,实现了弯管中轴向裂纹和直管中点蚀缺陷的高灵敏度检测。通过实验可以验证,该传感器在激励频率为 0.32 MHz 下能够对弯管中长度为 3 mm 的轴向裂纹和直管中直径为 0.4 mm 的点蚀缺陷进行有效检测。

关键词: 扭转导波;频域-波数域分析方法;轴向裂纹;点蚀缺陷

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

High-sensitivity detection method of defects based on
the novel torsional guided-wave EMAT

Liu Dengrong Mao Fengjing

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: The $T(0,1)$ torsional guided wave is widely employed in pipe defect detection due to its non-dispersive characteristic. This paper presents a novel insertable torsional guided wave electromagnetic acoustic transducer, offering advantages of non-contact operation, simple structure, and high signal-to-noise ratio. The transducer primarily comprises arc-shaped coils, race-track shaped permanent magnets, and a support skeleton, generating torsional guided waves in the pipe based on the Wiedemann effect. Numerical simulations were first conducted to model the transducer's axial dynamic magnetic field and circumferential static bias magnetic field, verifying the feasibility of torsional wave generation and investigating the influence of pipe bend radius on torsional wave propagation. Subsequently, utilizing the proposed $T(0,1)$ torsional guided wave transducer combined with frequency-wavenumber analysis method, high-sensitivity detection of axial cracks in bent pipes and pitting defects in straight pipes was achieved. Experimental verification demonstrates that the transducer can effectively detect axial cracks 3 mm in length within bent pipes and pitting defects 0.4 mm in diameter within straight pipes at an excitation frequency of 0.32 MHz.

Keywords: torsional guided wave; frequency-wavenumber analysis method; axial cracks; pitting defects

0 引 言

小直径管道被广泛的应用于航空、航天等行业之中。例如在飞机构造中,各种管道线路犹如血管遍布机身,连接各路精密零部件,为飞机提供燃油、气体、或液压等作用,以保障飞机的航行安全和飞行寿命。由于管道在长时间的运行过程中,容易产生各种缺陷例如裂纹、点蚀腐蚀等,严重影响结构设备的完整性,因此需要定期进行无损检测(NDT)^[1]。超声波导波因其具有衰减小、传播距离远等优

点,被广泛应用于管道缺陷的检测^[2-3]。由于超声导波的频散现象和多模态特性,在管道缺陷检测中,需要选择合适的导波模式和激励频率。相对于纵向模态导波, $T(0,1)$ 扭转模态导波由于其在整个频率范围内的非频散特性,已被国内外学者广泛应用于管道检测^[4-6]。

目前,在管道中产生扭转导波的方法主要有两种:压电传感器^[7-8]和电磁超声传感器(EMAT)^[9-10]。相对于压电传感器来说,EMAT 在使用中不需要使用耦合剂,因此在使用中受到越来越多的关注。传统基于磁致伸缩效应的扭

扭转导波 EMAT 多采用外包覆式结构,即利用高饱和磁致伸缩材料贴附于管壁以激发和接收扭转导波^[11-13]。然而,此类传感器通常体积较大,难以适用于小直径管道的检测,因此亟需开发适用于铁磁性小直径管道的非接触式扭转导波 EMAT。

在管道缺陷检测方面,周向缺陷的导波检测研究已较为深入。例如,Liu 等^[11]采用改进的平面螺旋管阵列(MPSA)线圈与多永磁体包覆结构,成功激发 T(0,1) 模式导波,并对长度为 22 mm 的周向缺陷进行了检测;徐江等^[14]研制的 T(0,1) 扭转导波传感器实现了对等效横截面积损失约 3% 的周向刻槽缺陷的识别;Heinlein 等^[15]则系统研究了弯管中周向裂纹的角度与位置对 T(0,1) 导波反射信号的影响。这些成果表明,针对周向缺陷的 T(0,1) 扭转导波检测方法已相对成熟。然而,对于轴向缺陷与点蚀缺陷等非周向类缺陷,现有研究仍较为有限,缺乏高灵敏度的检测手段。特别是针对小直径管道中此类缺陷的 T(0,1) 扭转导波检测方法,尚待进一步探索。

因此,本文致力于开发一种适用于小直径管道检测的新型非接触 T(0,1) 扭转导波 EMAT,并且结合频域-波数域(f-k)分析方法来提升对小直径管道轴向缺陷与点蚀缺陷的检测能力,从而拓展扭转导波在管道无损检测中的应用范围。

1 传感器结构设计及缺陷检测方法

1.1 传感器工作原理

磁致伸缩现象体现了铁磁性材料在外加磁场作用下发生形变时存在的非线性相互作用,Wiedemann 效应是磁致伸缩效应的一种,即铁磁性材料中相互垂直的磁场会导致材料产生剪切变形。

在静态偏置磁场显著强于动态磁场的情况下,管道中导波振动的激励源是因为磁致伸缩效应引起的外部应变而产生的,该外部应变 S_{MS} 可以描述为^[16]:

$$S_{MS} = d^T H_D \quad (1)$$

其中, H_D 为动态磁场强度, d^T 为磁弹耦合系数矩阵。在柱坐标系式(1)可以表示为^[17]:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{\theta\theta} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{\theta z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ d_{12} & 0 & 0 \\ 0 & d_{35} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_\theta \\ H_z \\ H_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: r 、 θ 和 z 分别是柱坐标系中径向距离、方位角和高度坐标分量。 $\epsilon_{\theta\theta}$ 、 ϵ_{zz} 和 $\epsilon_{\theta z}$ 为应变分量; H_θ 、 H_z 和 H_r 为动态磁场分量; d_{11} 、 d_{12} 和 d_{35} 为磁弹耦合矩阵的元素,分别为:

$$d_{11} = \frac{\partial f(H)}{\partial H} \bigg|_{H_s}, d_{12} = -\frac{d_{11}}{2}, d_{35} = 3 \frac{f(H)}{H_s} \bigg|_{H_s} \quad (3)$$

其中, $f(H)$ 为材料的磁致伸缩曲线, H_s 为静态偏置磁场强度, H 为磁场强度。通过材料的应力应变关系可以得出:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{Ed_{11}}{(1-\nu^2)} \left(\frac{2-\nu}{2} \right) H_\theta \quad (4)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{Ed_{11}}{(1-\nu^2)} \left(\frac{2\nu-1}{2} \right) H_\theta \quad (5)$$

$$\sigma_{\theta z} = \frac{Ed_{35}}{2(1+\nu)} H_z \quad (6)$$

式中: $\sigma_{\theta\theta}$ 、 σ_{zz} 和 $\sigma_{\theta z}$ 为应力分量; E 和 ν 是材料的弹性模量和泊松比。当动态磁场沿管道轴向时, $H_z \neq 0$, $H_\theta = 0$, 因此应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 和 σ_{zz} 可以忽略,即在周向静态偏置磁场和轴向动态磁场的作用下,管道中的应力 $\sigma_{\theta z}$ 是激励产生扭转导波的主要原因。

1.2 传感器结构设计

图 1(a) 所示为所提出的新型内插式磁致伸缩扭转导波 EMAT 的结构示意图,它主要由跑道型永磁体、弧形线圈以及支撑骨架组成。在轴向上,传感器的相邻弧形线圈电流走向相反,用于产生相反方向的轴向高频动态磁场。由于永磁体在周向上产生对称分布的静态偏置磁场,因此在周向上分布的弧形线圈的走向也对称分布。其中,永磁体使用的是 NdFeB 材料烧结的 N35 磁体,支撑骨架则是通过 3D 打印的树脂材料进行制作。图 1(a) 中传感器每一簇线圈的宽度为 d , 线圈中心之间的间距为 D , D 为导波波长的一半。永磁体的长度为 l , 高度为 h , 以及宽度为 w 。值得注意的是,在制作传感器时,永磁体和线圈之间会使用铝箔进行隔离,用于减小噪声信号;传感器外表面会使用聚酰亚胺胶带进行包裹来减小线圈和管壁的摩擦。而线圈的匝数取决于线圈线径,但需要保证线圈的宽度 d 不少于导波波长的 1/4。图 1(b) 所示为传感器和管道装配示意图,在装配时要尽量减小传感器和管道之间的间隙,保证传感器在管道中不能发生晃动。

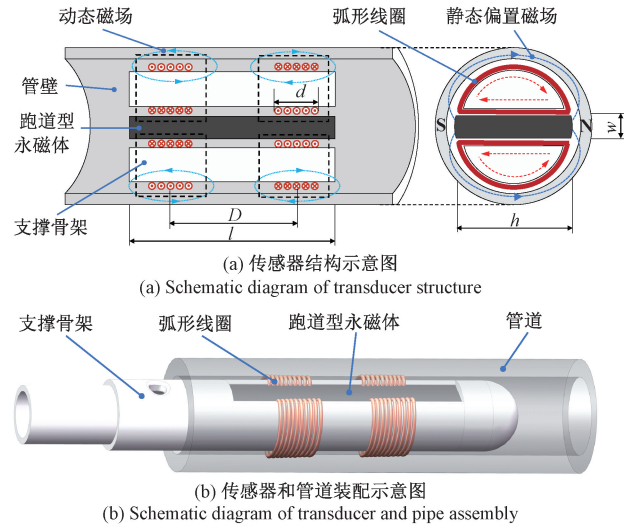
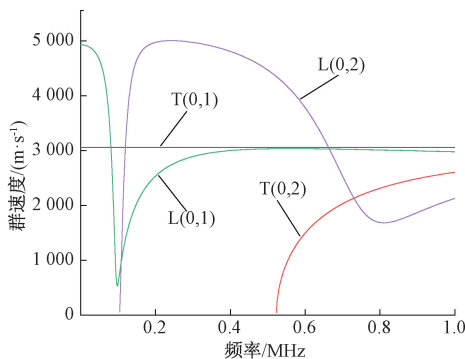


图 1 新型扭转导波 EMAT 的结构设计

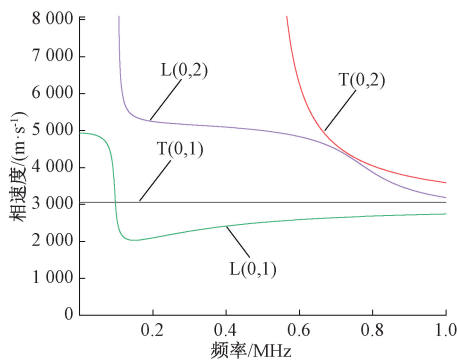
Fig. 1 Structural design of the novel torsional guided wave EMAT

从理论上可以计算出导波在管道中的频散曲线。本文的研究对象为内径为 13 mm、外径为 19 mm 的 2205 双相不

锈钢管道。不锈钢管道的密度为 $7\,810\text{ kg/m}^3$, 杨氏模量为 190 GPa , 泊松比为 0.3 。图 2 所示为该管道的导波频散曲线, 可以看出, $T(0,1)$ 模式导波是非频散的, 双相不锈钢管道中 $T(0,2)$ 的截止频率 $f_{\text{cut-off}}$ 约为 523 kHz 。因此为了生成 $T(0,1)$ 模式导波, 选择的激励频率应该低于 $T(0,2)$ 的截止频率。例如当激励频率被选择为 $f_c = 0.16\text{ MHz}$, 此时导波的相速度为 $3\,059\text{ m/s}$, 对应的导波长度为 $\lambda = 19.2\text{ mm}$, 因此传感器的线圈中心间距应该为 $D = \lambda/2 = 9.6\text{ mm}$ 。



(a) 群速度频散曲线
(a) Group velocity dispersion curve



(b) 相速度频散曲线
(b) Phase velocity dispersion curve

图 2 导波频散曲线

Fig. 2 Guided wave dispersion curve

1.3 基于 f-k 分析的管道缺陷扫描检测方法

该方法的检测和信号处理过程如图 3 所示。选择被检测管道的直线部分作为扫描区域, 其中内插式传感器以均匀的速度从 P_1 点轴向扫描到 P_n 点, 管道的其余部分则被视为检测区域。经过扫描得到的一系列时域信号通过如图 3 中所示方法进行分析处理。传感器以间隔 Δx 轴向扫描的范围长度为 l , 生成的时间一位移 (t - x) 域信号矩阵通过二维傅立叶变换可转换为频率一波数 (f - k) 域。之后采用二维高阶高斯函数型窗函数对含有多种模式特征的 f - k 域信号进行滤波和单方向单一模式的提取, 并采用二维反傅里叶变换转换回 t - x 域, 以消除其他模式 and 另一方向的导波的干扰。最后, 通过时域信号延时叠加, 将 t - x 域的二维信号重构为增强的时域信号。下面将详细介绍该算法的步骤:

1) 通过扫描步长为 Δx 和扫描长度为 l 的传感器获得的不同扫描点的时域信号被组装为 t - x 域中的数据矩阵。使用二维傅立叶变换将数据矩阵变换到 f - k 域中, 数据矩阵为:

$$U(k, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S(x, t) e^{-j(2\pi ft - kx)} dt dx \quad (7)$$

其中, $S(x, t)$ 表示 t - x 域中的数据矩阵。

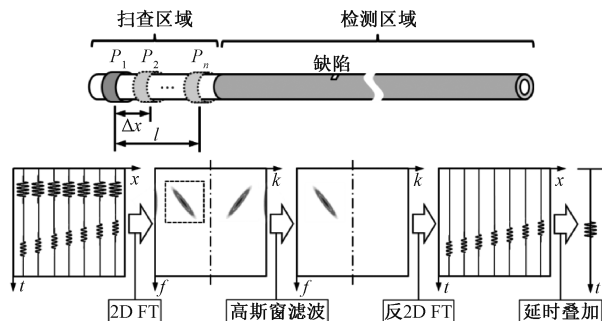


图 3 基于 f-k 分析的超声导波检测方法原理

Fig. 3 Principle of ultrasonic guided wave inspection based on f-k analysis

2) 由于超声导波的激励是窄带频率的正弦激励, 超声导波的回波在 f - k 域中近似呈现为短的直线段。并且来自两个反方向的相同模式的回波将对称出现, 且位于 f - k 域的相同频率范围内。因此, 可以通过截断另一侧的 f - k 域来提取某一方向的导波分量。此外, 可以通过在 f - k 域中滤波来提取特定模式和方向的导波分量:

$$U_w(k, f) = U(k, f) \cdot W(k, f) \quad (8)$$

其中, $W(k, f)$ 表示用于滤波的 f - k 域中的窗函数, 可以表示为:

$$W(k, f) = \exp \left[- \left(\frac{[k - k_0 - (f - f_0)/c_p]^2}{2\sigma_k^2} + \frac{(f - f_0)^2}{2\sigma_f^2} \right)^N \right] \quad (9)$$

其中, k_0 表示激励信号的中心波数, 而 f_0 表示激励信号的中心频率, N 表示高斯函数的阶数, σ_k 和 σ_f 分别表示波数和频率范围的半带宽度, c_p 为导波的相速度。

3) 然后通过二维傅立叶逆变换将 f - k 域中的滤波数据矩阵变换回 t - x 域。具有所选模式和方向的导波分量在 t - x 域数据矩阵中显示为 $S_w(x, t)$:

$$S_w(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} U_w(k, f) e^{j(2\pi ft - kx)} df dk \quad (10)$$

4) 最后, 将 t - x 域中的信号进行延时叠加, 以进一步降低噪声, 增强信噪比:

$$s_w(t) = \sum_{i=1}^n S_w(x_i, t + \Delta t_i), \quad \Delta t_i = \frac{i \cdot \Delta x}{c_p} \quad (11)$$

其中, $s_w(t)$ 即延时叠加后的时域信号。

2 数值仿真

2.1 传感器磁场仿真

首先研究静态磁场分布并检验其均匀性, 永磁体产生

的周向磁场可以简化为二维模型进行仿真分析。在有限元模型中,永磁体采用 NdFeB 材料烧结的 N35 磁体,几何参数为:宽度 w 为 5 mm,高度 h 为 12.4 mm。管道的内外径分别为 13 mm 和 19 mm,材料的其他各种参数也和实际材料参数相同。图 4(a) 所示为永磁体磁场仿真计算模型。同样地,为了研究线圈磁场分布并检验其均匀性,通过数值模拟对线圈磁场分布进行仿真分析。在有限元模型中,线圈的宽度 d 为 6 mm,支撑骨架的直径 ϕ 为 12.4 mm。取一簇线圈的中心位置处的管道截面进行分析,图 4(b) 所示为线圈磁场仿真计算模型。这里省略了永磁体磁场稳态分析和线圈磁场瞬态分析的细节。

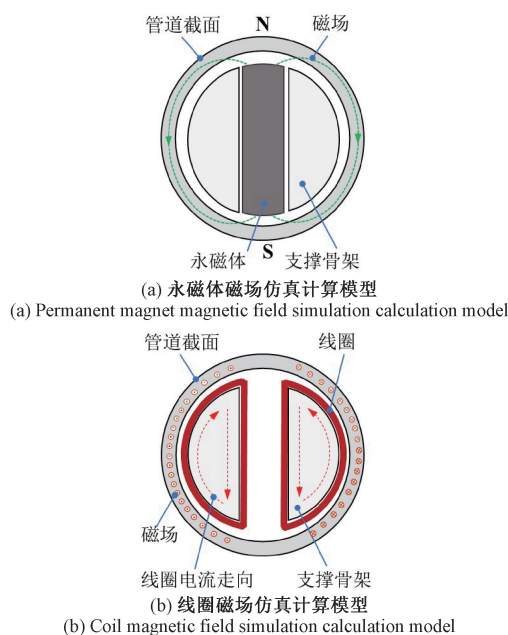


图 4 数值仿真计算模型

Fig. 4 Numerical simulation computational model

取管道内径为 16 mm 处的磁通密度进行分析,图 5(a) 和(b)所示分别为永磁体端所产生的周向磁通密度大小和某一瞬时线圈产生的轴向磁通密度大小。可以看出,管道内周向和轴向磁通密度都是类似于双椭圆形的磁场分布。因此,通过数值模拟表明所开发传感器的永磁体产生的周向静态磁场和线圈所产生的轴向动态磁场可以产生扭转模态导波。

2.2 扭转导波弯管传播仿真

为了研究扭转导波传感器在弯管轴向裂纹检测上的应用,首先通过数值模拟计算了不同弯曲半径的弯头对于扭转导波传播的影响。数值模拟模型如图 6 所示,弯头弯曲角度为 90° ,通过改变弯头的弯曲半径 R 来进行数值仿真。在数值模拟中,导波的激励频率为 0.16 MHz,根据频散曲线可计算出导波波长为 19.2 mm。管道的内径为 13 mm,外径为 19 mm。为了节省计算时间,管道总长度设置为 0.6 m。仿真中的扭转导波的激励是直接

在表面处施加圆周方向的交变力来实现的,导波时域信号的拾取则是采用自激自检模式,即通过拾取导波激励区域的信号幅值进行分析处理。

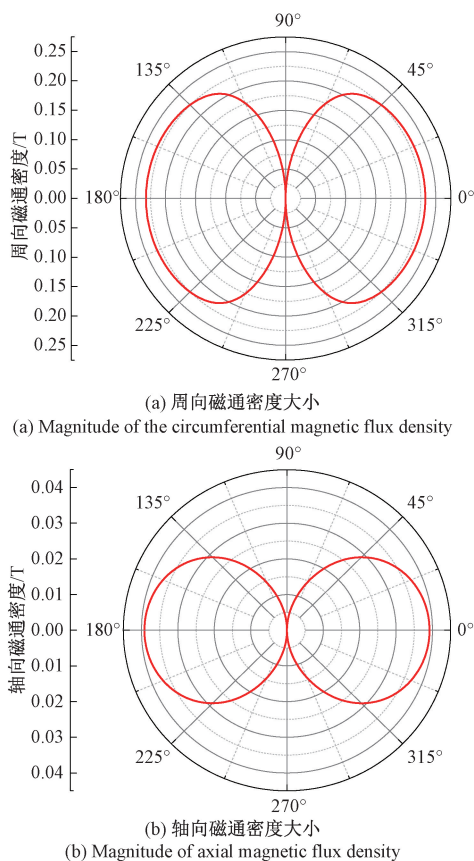


图 5 磁场计算结果

Fig. 5 Magnetic field calculation results

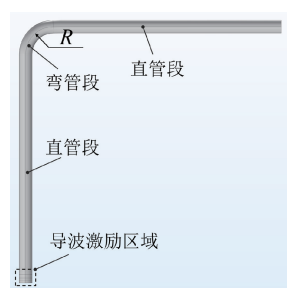


图 6 弯管数值计算模型

Fig. 6 Numerical calculation model of bent pipe

数值模拟结果如图 7 所示,当弯管弯曲半径和导波波长相当时(即弯曲半径为 20 mm),导波时域信号中会有非常明显的弯头回波。而当弯曲半径约为导波波长的 2 倍时,弯头回波基本可以忽略。图 8 所示为不同弯曲半径下弯头回波幅值的变化曲线,发现随着弯曲半径的增加,弯头回波信号幅值会显著下降,因此可以认为当弯曲半径为导波波长的 2 倍及以上时,弯头不会对扭转模态导波的检测产生影响。

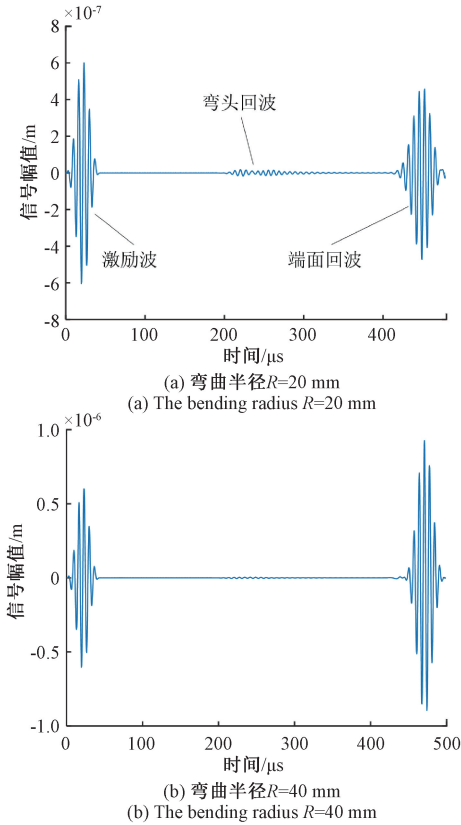


图 7 不同弯曲半径下的扭转导波时域信号
Fig. 7 Time-domain signals of torsional guided waves at different bending radius values

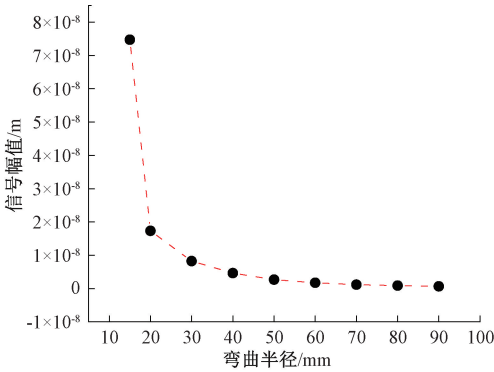


图 8 不同弯曲半径下弯头的回波幅值变化曲线
Fig. 8 Curve of echo amplitude variation for elbows at different bending radius

3 实验验证

3.1 传感器及实验系统

传感器的实物图如图 9(a)所示,动态线圈组由手工缠绕而成,线圈材料为漆包线,漆包线的线径为 0.2 mm,每簇线圈宽度为 6 mm。图 9(b)显示了用于磁致伸缩扭转模态传感器进行的实验系统,它主要由高功率电磁超声检测系统 RITEC-RAM5000、带有控制软件的计算机、双工器、

滤波器、示波器、传感器以及被测管道组成。图 9(c)所示为实验流程图,它的工作原理主要是由计算机控制 RITEC-RAM5000 产生高功率脉冲串电压,然后将电压通入扭转模态传感器,双工器是用于传感器自激自检模式下激励信号和检出信号的分离,接着将所输出的信号通入滤波器进行滤波处理,再通过示波器采集和存储接收信号,最后结果由计算机分析处理。

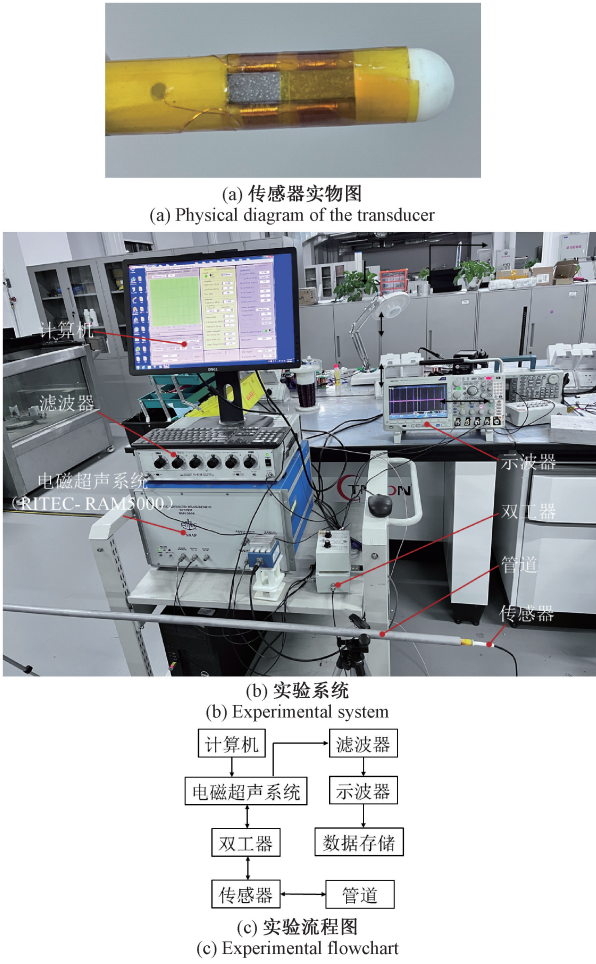


图 9 传感器和实验系统

Fig. 9 Transducer and experimental system

3.2 弯管周向裂纹检测

通过数值模拟可知,当弯管弯曲半径为导波波长的 2 倍及以上时,弯头不会对扭转模态导波的检测产生影响。因此制作了一根长度为 1.2 m,弯头弯曲半径为 40 mm 的管道试件。如图 10 所示为管道试件,为了验证所开发的传感器在弯管上的轴向裂纹检测能力,在弯曲半径为 40 mm 的管道上加工了一个轴向长度为 3 mm,深度 1.5 mm,宽度为 0.5 mm 的刻槽缺陷来模拟管道轴向裂纹。采用所开发的激励频率为 0.16 MHz 扭转模态传感器进行实验,传感器采取自激自检模式,如图 11 所示为弯管的检测结果。本文引入峰值信噪比(PSNR)来对数据进行分析,PSNR 的数

学表达式具体为:

$$SNR_{dB} = 20 \lg \frac{A_{signal}}{A_{noise}} \quad (12)$$

式中: SNR_{dB} 为缺陷信号的信噪比, A_{signal} 为缺陷回波峰值幅值, A_{noise} 为噪声平均幅值。通过计算可知缺陷信号的信噪比为 10.2 dB, 验证了该传感器在弯管轴向裂纹上的检测能力和具有高信噪比的特点。

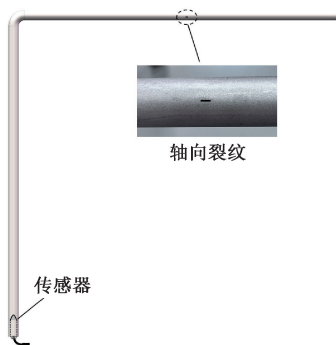


图 10 管道试件

Fig. 10 Pipe test specimen

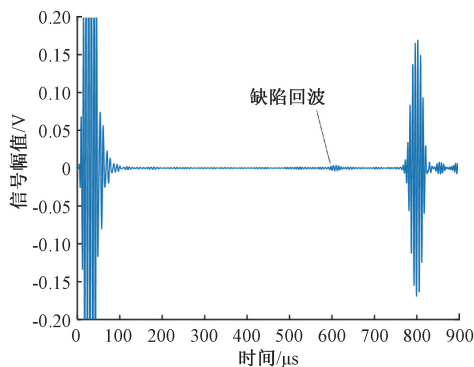


图 11 0.16 MHz 频率下导波检测结果

Fig. 11 Guided wave inspection results at 0.16 MHz frequency

通过弯管轴向裂纹的检测结果可以看出, 低频 (0.16 MHz) $T(0,1)$ 模态导波在检测较短的轴向裂纹 (长度 3 mm) 的效果不佳。由于 $T(0,1)$ 模态导波的非频散特性, 可以制作出更高频的传感器对管道轴向裂纹进行检测。图 12 所示即为设计频率为 0.32 MHz 的扭转导波传感器实物图, 由于传感器制作的工艺问题, 传感器会在管道中或多或少会激发其他模态的导波, 因此为了提高信噪比, 传感器采用一发一收模式进行导波的激励和接收。图 13 所示为检测信号, 相对于激励频率为 0.16 MHz 的扭转导波传感器来说, 缺陷回波更明显。同时可以发现, 由于传感器是一发一收模式, 传感器的激励端和接收端的间距远大于波长, 因此沿着管道双向传播的激励导波在空间上没有叠加在一起, 导致出现了两个缺陷回波以及两个端面回波, 这不利于缺陷的检测分析。为了解决这些问题, 下面将利用 f-k 分析方法来进行弯管轴向裂纹的检测。



图 12 高频扭转导波传感器实物图

Fig. 12 Physical diagram of high-frequency torsional guided wave transducer

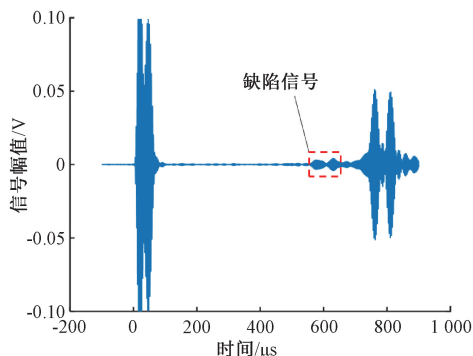


图 13 0.32 MHz 频率下的检测结果

Fig. 13 Detection results at 0.32 MHz frequency

将所开发的高频扭转导波传感器用于弯管的轴向扫描检测, 扫描步长为 2 mm, 扫描点数为 21 个。结果如图 14 所示, 图 14(a) 所示为轴向扫描数据的 t-x 域图, 激励波和端面回波以直线形式出现。可以根据直线的斜率来揭示导波的模态和方向, 由于传感器的激励导波是两个方向同时进行, 具有正斜率的直线表示来着传感器靠近缺陷一侧 (右侧) 的 $T(0,1)$ 模态导波, 具有负斜率的直线则表示来自传感器远离缺陷一侧 (左侧) 的导波。然后将 t-x 域转换为 f-k 域, 如图 14(b) 所示, 有两个主要分量, 来自两个方向的 $T(0,1)$ 模态导波。其余的则为噪声以及其他模态的导波。图 14(c) 所示为二维高斯窗函数, 利用二维高斯窗函数对 f-k 域进行滤波, 滤波后的 f-k 域如图 14(d) 所示, 只有来自传感器靠近缺陷一侧 (右侧) 的导波的分量被保留在 f-k 域中。接着将 f-k 域数据转换回 t-x 域, 如图所示 14(e) 所示, 可以清晰的看见缺陷回波和端面回波。最后将 t-x 域数据进行延时叠加, 以减少来自另一侧导波的噪声和干扰分量, 处理后的时域信号如图 14(f) 所示, 通过计算可得缺陷信号的信噪比高达 15.8 dB。与图 13 中单个测量点的时域信号相比, 通 f-k 分析方法处理后的信号中消除了干扰分量, 得到了单方向的模态导波, 获取到了信噪比更高的轴向裂纹信号。表 1 所示为 f-k 分析处理前后峰值信噪比对比情况, 可以计算得出, 经过 f-k 分析处理后, 缺陷信号的信噪比提升了 54.9%。

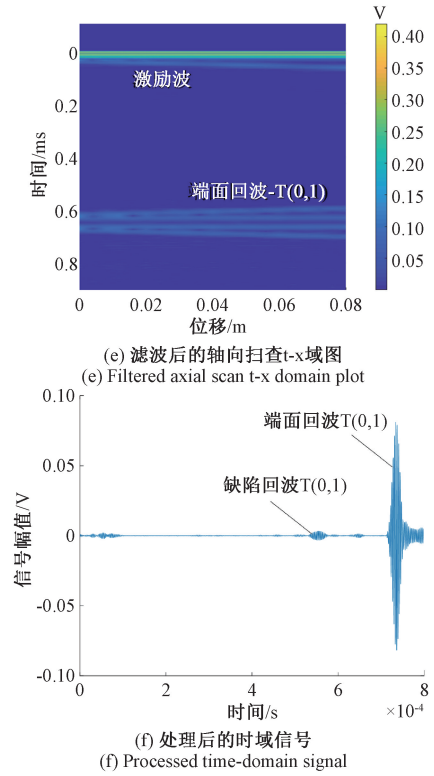
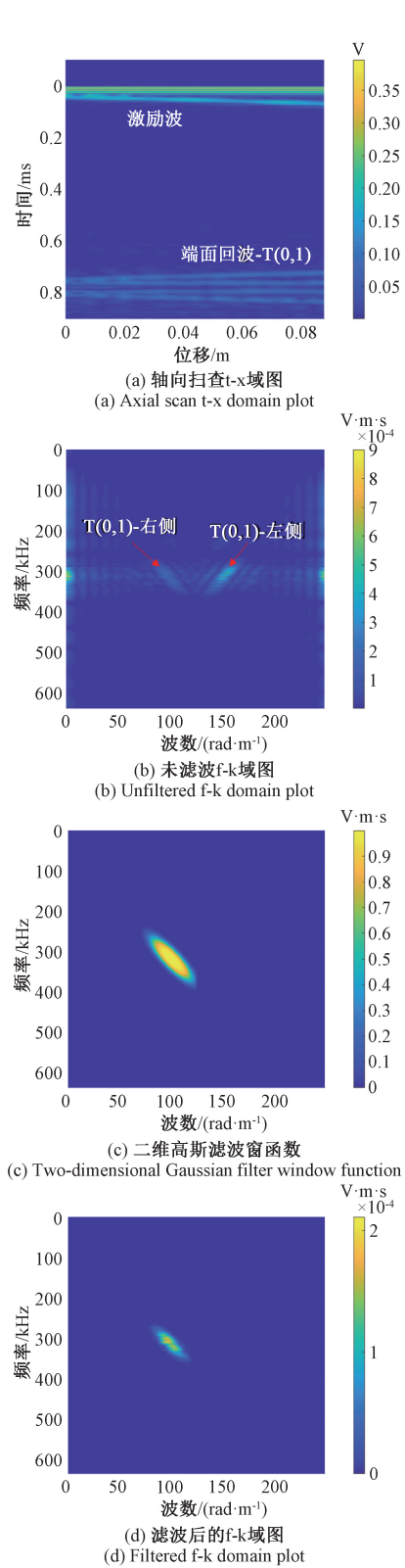


图 14 弯管轴向裂纹检测结果

Fig. 14 Detection results for axial cracks in bent pipes

表 1 f-k 分析处理前后峰值信噪比对比情况
Table 1 Comparison of peak signal-to-noise ratio before and after f-k analysis processing

情况	峰值信噪比/dB
分析前	10.2
分析后	15.8
提升幅度	5.6

3.3 管道点蚀缺陷检测

为了体现扭转导波对小直径管道点蚀缺陷的检测能力,制作了长度为 3 m 的带有 3 个点蚀缺陷的管道试件,如图 15 所示为管道实物图,点蚀缺陷的直径分别为 0.4、0.7 mm 和 1 mm,深度均为 1.5 mm。图 15 中标注了点蚀缺陷的位置信息。

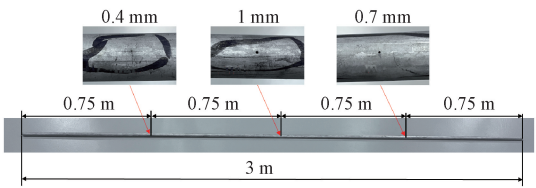


图 15 带有点蚀缺陷的管道实物图

Fig. 15 Actual photograph of a pipe with pitting defects

仍然采用了频率为 0.32 MHz 的扭转导波传感器进行检测实验。图 16(a)为从管道右侧进行单点检测的结果,

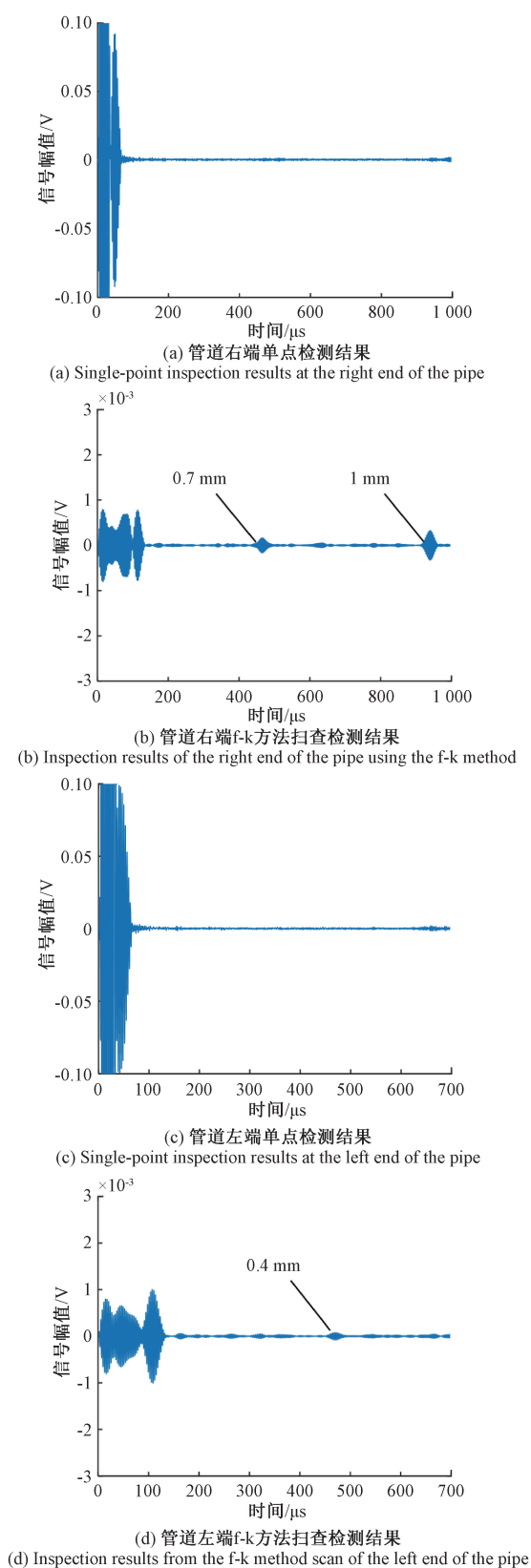


图 16 管道不同直径点蚀缺陷的检测结果

Fig. 16 Detection results of pitting defects at different pipe diameters

从信号中难以辨别出点蚀缺陷信号。同样地利用了 f-k 分析方法进行扫查检测,扫查步长为 2 mm,扫查点数为 26 个,实验结果如图 16(b)所示。可以发现,运用该方法能够清晰的检测到直径为 0.7 mm 的点蚀缺陷以及检测距离长达 1.5 m 的直径为 1 mm 的点蚀缺陷。同样地,从管道左侧进行检测,图 16(d)所示为从管道左端利用 f-k 方法扫查检测的结果,发现对于直径为 0.4 mm 的点蚀缺陷的检测回波幅值较小,但是也能分辨出来。

因此,通过实验表明,利用高频扭转导波传感器并且结合 f-k 分析方法能够实现管道轴向裂纹以及点蚀缺陷的高灵敏度检测,体现了所开发的传感器在小直径铁磁性管道检测上的有效性。理论上,由于 $T(0,1)$ 模式导波没有频散现象,因此可以根据本文所提出的结构制作出更高频的扭转导波传感器,用于检测更小的缺陷。

4 结 论

本文提出了一种新型内插式电磁超声扭转导波传感器,该传感器主要由弧形线圈、跑道型永磁体和支撑骨架组成。跑道型永磁体在管道的圆周方向上提供静态偏置磁场,弧形线圈用于在管道轴向方向上产生动态的交变磁场,基于 Wiedemann 效应在管道中产生扭转导波。然后通过数值模拟计算了静态偏置磁场和瞬态交变磁场的分布和大小,以及研究了弯管弯曲半径对 $T(0,1)$ 模式导波传播的影响。最后根据所提出的结构制作出了扭转模式导波传感器,结合 f-k 分析方法和高频扭转模式传感器实现了弯管轴向裂纹和管道点蚀缺陷的高灵敏度检测。因此,本文所提出的新型内插式电磁超声扭转导波传感器以及结合 f-k 分析方法在铁磁性小直径管道的检测上具有非常重要的应用价值。

参考文献

- [1] 花云龙,李文君,赵鹏飞. 压力管道金属损失缺陷致因及检测技术[J]. 管道技术与设备, 2025(3): 35-39.
HUA Y L, LI W J, ZHAO P F. Causes and detection technologies of metal loss defects in pressure pipelines[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2025(3): 35-39.
- [2] 周文涛,王平,杨元,等. 基于编解码的超声导波轨底裂纹识别方法研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(2): 130-135.
ZHOU W T, WANG P, YANG Y, et al. Research on the identification method of small cracks on the bottom of ultrasonic guided waves based on codec [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(2): 130-135.
- [3] 许溢航,王平,杨元,等. 脉冲压缩在超声导波钢轨断裂检测的应用研究[J]. 电子测量技术, 2025, 48(3): 112-117.
XU Y H, WANG P, YANG Y, et al. Research on the

- application of pulse compression in ultrasonic guide wave rail fracture detection [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2025, 48(3): 112-117.
- [4] ZANG X L, XU ZH D, LU H F, et al. Ultrasonic guided wave techniques and applications in pipeline defect detection: A review[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2023, 206: 105033.
- [5] NIU X D, 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.
- [6] LIU W C, CAI W J, KANG L, et al. Research on ultrasonic guided wave pipeline defect detection method based on modal analysis [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2834(1): 012078.
- [7] FATERI S, LOWE P S, ENGINEER B, et al. Investigation of ultrasonic guided waves interacting with piezoelectric transducers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(8): 4319-4328.
- [8] WAN X, LIU M R, ZHANG X H, et al. Excitation and propagation of longitudinal $L(0, 2)$ mode ultrasonic guided waves for the detection of damages in hexagonal pipes: Numerical and experimental studies[J]. *Shock and Vibration*, 2021, DOI:10.1155/2021/6641828.
- [9] CLOUGH M, FLEMING M, DIXON S. Circumferential guided wave EMAT system for pipeline screening using shear horizontal ultrasound[J]. *NDT and E International*, 2017, 86: 20-27.
- [10] ZHANG Y H, WEI X, QIAN ZH H, et al. A study on torsional guided wave EMAT array and its application in embedment depth inspection of guardrail post [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2020, 64(1-4): 1065-1072.
- [11] LIU Z H, FAN J W, HU Y N, et al. Torsional mode magnetostrictive patch transducer array employing a modified planar solenoid array coil for pipe inspection[J]. *NDT and E International*, 2015, 69: 9-15.
- [12] WANG SH J, LI C, MA X H, et al. Broadband torsional guided wave magnetostrictive patch transducer with circumferential alternating permanent magnet array for structural health monitoring [J]. *Ultrasonics*, 2022, 125: 106805.
- [13] KIM Y Y, KWON Y E. Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides[J]. *Ultrasonics*, 2015, 62: 3-19.
- [14] 徐江,陈广,刘志伟,等.非接触式磁致伸缩扭转导波传感器研制[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(1): 13-17,21.
- XU J, CHEN G, LIU ZH W, et al. Development of non-contact magnetostrictive sensor for exciting torsional guided wave [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2019, 47(1): 13-17,21.
- [15] HEINLEIN S, CAWLEY P, VOGT T K. Reflection of torsional $T(0,1)$ guided waves from defects in pipe bends[J]. *NDT and E International*, 2018, 93: 57-63.
- [16] OH J H, SUN K H, KIM Y Y. Time-harmonic finite element analysis of guided waves generated by magnetostrictive patch transducers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(8): 085007-1-085007-13.
- [17] KIM H J, LEE J S, KIM H W, et al. Numerical simulation of guided waves using equivalent source model of magnetostrictive patch transducers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(1): 015006.

作者简介

刘登荣(通信作者),硕士,主要研究方向为机载测试技术研究和测试设备研制等。

E-mail:liudengrong@stu.xjtu.edu.cn

毛丰晶,硕士,主要研究方向为试飞数据处理和软件开发等。

E-mail:mjf2362821156@stu.xjtu.edu.cn