

磁致伸缩扭转导波小管径弯管检测*

耿海泉,王悦民,陈乐,邓文力,叶伟
(海军工程大学动力工程学院,湖北武汉 430033)

摘要:针对扭转导波对小管径弯管的检测问题,分别采用数值模拟和实验方法进行研究。使用 ANSYS 软件模拟扭转导波在弯管中的传播;设计一种针对小管径管道的磁致伸缩扭转导波检测传感器,并对弯管进行检测,建立该传感器的导波激发和接收模型,利用理论模型对实验信号进行解读。研究表明: $T(0,1)$ 模态导波在小管径管道弯头处发生模态转换,部分 $T(0,1)$ 模态转换成 $F(1,1)$ 模态, $F(1,1)$ 模态具有方向性,垂直于弯头拱背-拱腹方向;模态转换会造成检测信号的双端面反射现象,第二个端面回波与第一个端面回波幅值比随频率的增大呈减小趋势;传感器激发出的纵向磁致伸缩力会导致实验信号中出现少量纵向模态导波。研究结论为磁致伸缩扭转导波对小管径弯管的检测提供理论指导。

关键词:磁致伸缩; $T(0,1)$ 模态导波;弯管;模态转换

中图分类号:TG115.28;TB551 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)01-168-08

Inspection of small diameter bending pipes using magnetostrictive torsional guided wave

GENG Haiquan, WANG Yuemin, CHEN Le, DENG Wenli, YE Wei

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming to the problem of the inspection of small diameter bending pipes using torsional guided wave, finite element method and experiments were used to investigate the problem. ANSYS was used to simulate the propagation of torsional guided wave in bending pipe. A magnetostrictive torsional guided wave transducer was designed to inspect small diameter pipes. The exciting and receiving theoretical model of the transducer was built. The experimental signals were explained by using the theoretical model. Research results show that mode conversion happens at the elbow of the pipe and part of the $T(0,1)$ mode converts to $F(1,1)$ mode. The orientation of the $F(1,1)$ mode perpendicular to the direction of extrados-intrados. The double end reflection phenomenon in inspection signal is caused by mode conversion. With the increase of frequency, the ratios between end echoes' trend towards alleviation. The longitudinal magnetostrictive forces excited by the transducer bring about small longitudinal guided wave in the signals. Conclusions will provide theoretical guide to the inspection of small diameter bend pipes using magnetostrictive torsional guided wave.

Key words: magnetostrictive; $T(0,1)$ mode guided wave; bend pipe; mode conversion

管道广泛存在于舰艇装备中,是输送油、水、汽等介质的重要载体,管道缺陷的出现会造成重大事故和经济损失,严重影响舰艇战斗力。因此,及时对管道进行健康监测对保障管道安全运行具有十分重要的意义。与传统无损检测技术相比,超声导波检测技术具有检测高效、经济和可以检测难以接近空间处管道等优点,已经广泛应用于管道健康监测实践中。然而,在广泛应用的同时,超声导波检测技术也面临众多难题和挑战。含弯头管道的检测是所面临的众多难题之一,弯头的存在会对导波传播造成干扰,发生散射和模态转

换,进而影响导波对管道缺陷的检测。因此,研究超声导波对含弯头管道的检测具有十分重要的意义。

在导波对管道弯头检测方面,许多研究者已经做了很多工作。Nishino^[1]使用超声导波检测技术对焊接而成的外径为 70.5 mm 的“直管-弯头-直管”管道结构进行缺陷检测,缺陷位于过弯头直管段处,检测结果表明导波缺陷检测的灵敏度为检测直管缺陷的 1/5 ~ 1/4。Furuhashi 等^[2]利用半解析有限元和实验方法研究了超声导波在外径为 50 mm 管道弯头处的模态转换和

* 收稿日期:2016-11-27

基金项目:国家部委基金资助项目(9140A27020115JB11001)

作者简介:耿海泉(1989—),男,山东邹平人,博士研究生,E-mail:genghq_1989@163.com;

王悦民(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:ym99wang@163.com

传播速度的变化。Miki 等^[3]使用时间反转和相控阵技术实现了导波在外径为 61 mm 管道弯头处的聚焦,并抑制模态转换的出现,增强了对弯头区域缺陷的检测能力。Zhou 等^[4]使用波动有限元方法提取导波特征模态和分析导波在外径为 51 mm 管道中的传播特性,研究结果表明为了选择最佳检测模态需要获得导波特征模态和传播特性。Furukawa 等^[5]使用大型有限元代码对导波在外径为 60 mm 弯管中的传播进行了可视化,研究了 $T(0,1)$ 模态导波在弯头处的模态转换。Bakkali 等^[6]使用半解析有限元法和模态匹配方法计算了导波在管道弯头处的散射矩阵,并对反射和透射系数进行了预测。Predoi 等^[7]使用有限元方法模拟了 $L(0,2)$ 模态导波在含缺陷外径为 2 inch (50.8 mm) 管道弯头处的散射特性。Sanderson 等^[8]使用解析模型方法研究了导波在外径为 88.9 mm 管道弯头处的传播特性,该解析模型可以预测管道弯头对导波的影响,并且可以消除该影响。Verma 等^[9]使用有限元模拟方法模拟了 $L(0,2)$ 模态导波在任意弯曲角度,外径为 60 mm 管道弯头处的传播特性,研究了弯曲半径和导波波长比对导波在弯头处反射和透射特性的影响,最后用实验验证了有限元模拟的正确性。Brath 等^[10]使用二维声学模型对三维导波传播模型进行近似,计算了弯曲模态的传播时间。罗更生等^[11]研究了 $L(0,2)$ 模态导波在外径为 159 mm 管道弯头处传播的能量分布特性和弯头拱背处典型缺陷的检测。周邵萍等^[12]利用实验和有限元模拟的方法研究了 $L(0,2)$ 模态导波在外径为 70 mm 管道弯头处的模态转换现象以及模态转换对检测造成的影响;研究结果表明, $L(0,2)$ 模态导波在弯头处发生模态转换,产生弯曲模态 $F(1,2)$,导波对弯头外侧缺陷敏感度高。Ni 等^[13]利用实验和有限元模拟方法研究了 $L(0,2)$ 模态导波在含不同双弯头,外径为 70 mm 管道中的传播特性和对不同位置缺陷灵敏度的不同,研究结果表明,导波在穿过第一个弯头和第二个弯头时具有不同的特征,导波对第二个弯头处缺陷的灵敏度与第一个弯头处缺陷灵敏度不同。Qi 等^[14]研究了 $T(0,1)$ 模态导波在外径为 70 mm 管道弯头处的传播特性和对弯头缺陷的检测能力。研究结果表明, $T(0,1)$ 模态在弯头处的透射率与频率有很大关系,在 75 kHz 时大部分 $T(0,1)$ 模态转换成 $F(1,2)$ 模态,缺陷在弯头处的不同位置会影响导波模态的转换程度。

以上研究工作主要集中在导波对较大管径

(外径大于等于 50 mm) 含弯头管道的检测研究,对导波检测小管径(外径小于等于 20 mm) 含弯头管道的研究较少。不同外径管道的导波频散曲线有很大不同,因而管道中存在的模态也可能存在不同,因而研究超声导波对小管径管道弯头的检测具有重要意义。扭转导波因其非频散特性被广泛应用于管道检测中,同时当管道中含有液体时,扭转导波的能量不会泄露进入液体中。常用导波传感器有磁致伸缩和压电两种类型,而压电陶瓷不具有柔软性,若想在小管径管道中激发出扭转导波需要加工成相应的弧度,操作复杂;而铁钴条带这一磁致伸缩材料具有柔软性,能够与管道接触良好,因而选用磁致伸缩传感器来激发扭转导波。本文首先利用有限元模拟方法研究了扭转导波在管道弯头处的模态转换现象和传播特性,然后利用磁致伸缩扭转导波检测技术对弯管进行实验检测,建立了磁致伸缩扭转导波激励和接收模型,并用该模型对实验信号进行了解读,检测结果验证了数值模拟的正确性。

1 $T(0,1)$ 模态导波弯管检测的数值模拟

1.1 有限元模型

本文使用 ANSYS/LS-DYNA 瞬态动力学分析模块建立超声导波弯管检测的有限元模型。因磁致伸缩导波整个激发和接收过程涉及电、磁、机械场的耦合作用,且目前对磁致伸缩机理研究还不够透彻,难以建立包含三种物理场的有限元模型,因此,本文模拟只涉及机械场的模拟,单纯研究导波在弯管中的传播特性,而不涉及传感器建模。所使用管道材质为不锈钢,密度为 7930 kg/m^3 ,弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.27。管道规格为长度 2.752 m,外径 20 mm,壁厚 3 mm,弯头弯曲半径为 50 mm。采用扫略划分方式进行网格划分,单元为 SOLID164 六面体单元,直管段轴向网格尺寸为 2.5 mm,弯管段中心线处轴向尺寸为 2 mm,周向划分 36 个单元。在管道端面外周等距分布的 12 个节点上施加经汉宁窗调制的 5 个周期 X 和 Y 方向上的正弦位移载荷,两方向合成载荷沿管道周向,在管道内激发出 $T(0,1)$ 模态导波,设置两个接收位置,接收 1 距激励端 2 个单元,接收 2 距弯头 0.2 m。所建模型和载荷施加如图 1 所示。

1.2 模拟信号的模态提取

通常有限元模拟信号的提取是将接收点位置圆周上每个节点接收到的信号相加再取平均,但

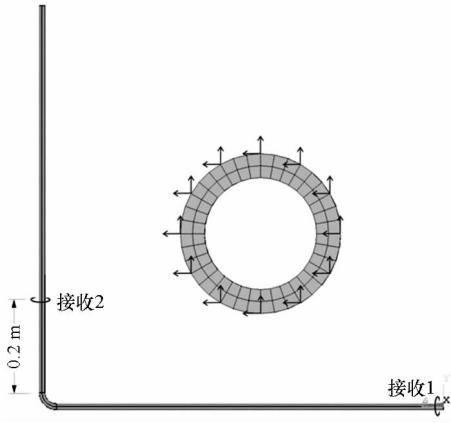


图 1 导波检测有限元模型

Fig. 1 Finite element model of guided wave inspection

是,这样得到的只有轴对称模式导波,无法得到非轴对称的弯曲模式导波,因此无法对导波在弯头处的模式转换现象进行研究。管道中弯曲模式导波的振型沿周向呈正弦谐波变化,利用弯曲波这一特点,可设计滤波函数得到单一模式的弯曲波模式。文献[15]中给出了该滤波函数的具体形式,即

$$S = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \{ \cos[l \cdot (\theta - \varphi_l)] \} \cdot s(\theta) d\theta \tag{1}$$

式中: S 为所要提取的目标模式; l 为目标模式的阶数; θ 为接收节点的周向角度; φ_l 为目标模式振型的角度偏移; $s(\theta)$ 为各节点接收到的信号。

使用 15 kHz 的激励信号对弯管进行检测,在接收 1 处外圆周取 12 个等距分布的节点,用于接收导波信号。使用模式提取技术提取导波信号中轴对称 $T(0,1)$ 模式导波和一阶弯曲模式导波,

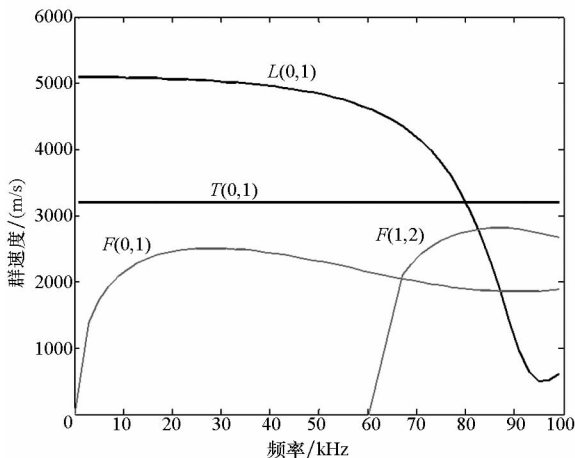


图 2 20 mm × 3 mm (外径 × 壁厚) 不锈钢管的群速度频散曲线

Fig. 2 Group velocity dispersion curves for the stainless steel pipe (20 mm outer radius, 3 mm wall thickness)

图 2 为管道频散曲线,从中可以看出,在频率为 15 kHz 时,一阶弯曲模式为 $F(1,1)$ 模式导波,其速度为 2359 m/s, $T(0,1)$ 模式导波速度为 3198 m/s。检测信号如图 3 所示, $T(0,1)$ 和 $F(1,1)$ 模式导波如图中箭头所指,利用频散曲线中导波速度计算 $T(0,1)$ 和 $F(1,1)$ 模式反射导波到达时间差为 0.149 ms,而数值模拟信号中两者时间差为 0.142 ms,两者十分吻合,说明数值模拟结果的正确性。

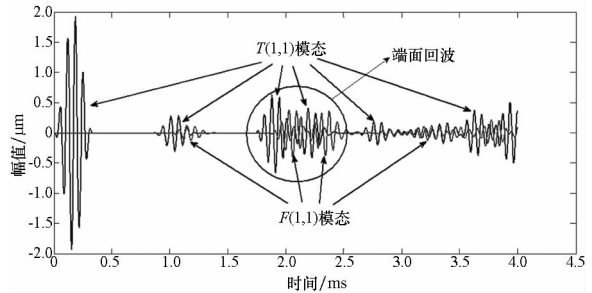


图 3 模式提取信号

Fig. 3 Extracted mode signals

2 $T(0,1)$ 模式导波在弯头处的模式转换

2.1 双端面反射现象

从图 3 中可以看出每种模式导波的端面反射回波有两个,下面将用模式转换对这一现象进行解释。当 $T(0,1)$ 模式导波穿过弯头后,管道中存在两种模式 $T(0,1)$ 模式和 $F(1,1)$ 模式,如图 4 所示。由于两种模式的传播速度不同, $T(0,1)$ 模式在前面, $F(1,1)$ 模式在后面,当两种模式遇到管端全部发生发射,导波将再一次穿过弯头; $T(0,1)$ 模式导波将首先穿过弯头,部分 $T(0,1)$ 模式在穿过弯头时会再次产生 $F(1,1)$ 模式,当在接收 1 位置处接收信号时,就形成了第一次 $T(0,1)$ 模式端面反射和 $F(1,1)$ 模式端面反射; $F(1,1)$ 模式导波后穿过弯头,部分 $F(1,1)$ 模式在穿过弯头时会产生 $T(0,1)$ 模式,当在接收 1 位置处接收信号时,就形成了第二次 $T(0,1)$ 模式端面反射和 $F(1,1)$ 模式端面反射。以上就是导波双端面反射形成的原因。因此,在检测小管径弯管时,不能把第二次端面反射回波误认为缺陷回波。通过以上分析可知,双端面回波中两波包的到达时间差是由于 $T(0,1)$ 与 $F(1,1)$ 模式导波的速度差造成的,两者共同传播的距离为过弯头直管长度的两倍,利用频散曲线中的速度得到时间差为 0.298 ms,而数值模拟信号中两者时间差为 0.282 ms,两者相差不大,误差主要由数值计算误差造成,以上也验证了双端面

反射形成原因的正确性。

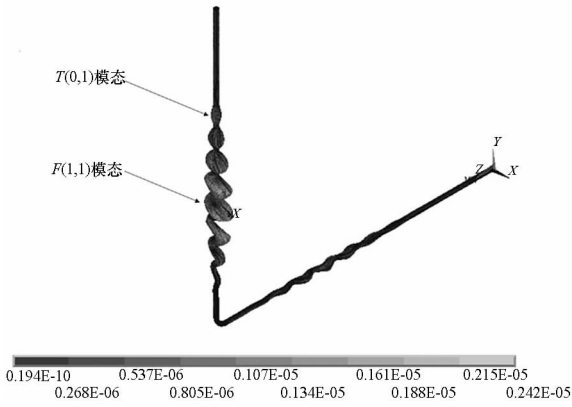


图 4 过弯头导波传播位移云图

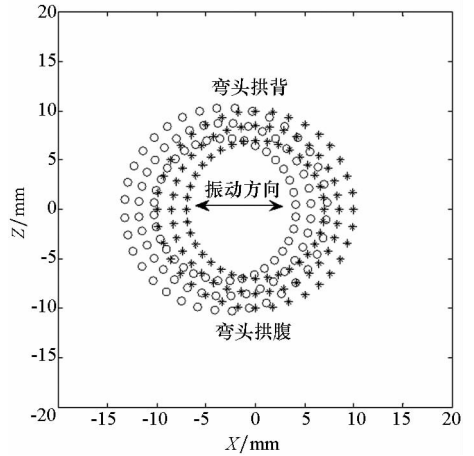
Fig.4 Displacement contour of guided wave propagate across the elbow

2.2 F(1,1) 模态的方向性

$F(1,1)$ 模态导波已不再具有轴对称性,其位移沿管道圆周方向呈一个周期的谐波变化,因此其在管道截面的振动具有一定的方向性。下面将使用有限元模拟的方法研究 $T(0,1)$ 模态导波在管道弯头处产生的 $F(1,1)$ 模态导波的方向性。

为得到弯头产生的 $F(1,1)$ 模态导波的偏振方向,分别取接收点 1 和接收点 2 处的管道截面节点,提取 $F(1,1)$ 模态导波到达时某一时刻节点位移信息,绘制管道截面变形图,如图 5 所示。图 5 中符号“*”表示未变形时节点位置,符号“o”表示放大变形后节点位置。

从图 5 中可以看出,无论管道弯头反射还是透射产生的 $F(1,1)$ 模态导波,其振动方向都垂直于管道结构的弯头拱腹-拱背方向,说明导波对垂直于弯头拱腹-拱背方向上的缺陷更具有敏感性。



(b) 弯头透射截面变形

(b) Section deform of transmission

图 5 管道截面变形图

Fig.5 Deformation of pipe cross-section

3 实验研究

为验证有限元模拟的正确性,使用自主开发的磁致伸缩导波检测系统对不锈钢弯管进行检测。该系统利用铁磁性材料的磁致伸缩特性来实现导波的激发和接收。

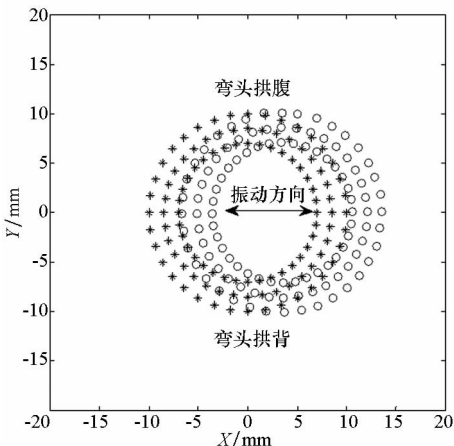
3.1 实验设置

实验所用管道材质为不锈钢,牌号为 oCr18Ni19,密度为 7930 kg/m^3 ,弹性模量为 206 GPa ,泊松比为 0.27 。管道外径为 20 mm ,壁厚为 3 mm ,长度为 2.752 m ,采用热弯技术将直管加工成弯曲半径为 50 mm 的弯管,弯头位于管道中间,两直管段长度相等。由于不锈钢属于非铁磁性材料,需要在管道表面粘贴换能材料来实现能量传递。本文使用具有高磁致伸缩系数的铁钴合金作为换能装置,其饱和磁致伸缩常数可达 60×10^{-6} ,而普通铁的饱和磁致伸缩常数仅为 9×10^{-6} 。由于管径较小,将铁钴合金裁剪成宽度约 7 mm 的长条状,环氧树脂胶用作耦合剂,沿管道圆周方向粘贴,这样可以使粘贴更为牢固;在激励和接收线圈下各粘贴 4 条铁钴条带,线圈宽度约 50 mm ,用永磁铁对铁钴条带进行周向预磁化,为进一步增大偏置磁场的强度,在线圈外周沿周向放置永磁铁,使磁力线沿圆周方向,其示意图如图 6 所示。在激励线圈中施加交变电流,在管道中激发出导波;接收线圈用于接收导波信号。

3.2 磁致伸缩扭转波激励与接收模型

3.2.1 激励模型

文献[16]给出了激励线圈产生动态磁场的本构方程,如式(2)所示。



(a) 弯头反射截面变形

(a) Section deform of reflection

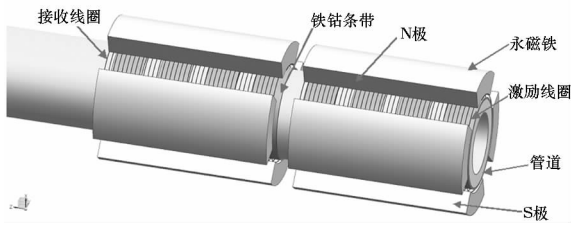


图 6 传感器模型

Fig. 6 Model of the transducer

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu\eta \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\mu(\mathbf{J}_s + \mathbf{J}_0) \quad (2)$$

式中： \mathbf{A} 为磁矢位； t 为时间； μ 为磁导率； η 为电导率； \mathbf{J}_0 为激励电流密度； \mathbf{J}_s 为源电流密度，其表达式如下：

$$\mathbf{J}_s = \frac{\eta}{S} \frac{\partial}{\partial t} \iint_R \mathbf{A} dS \quad (3)$$

式中： R 为导体的横截区域； S 为横截区域的面积。

为构建铁磁性材料弹性场与磁场的耦合方程，可参考压电材料的本构方程建立相似形式的方程^[17]：

$$S_I = d_{ij}^{(MS)} H_j + S_{IJ}^H \sigma_j \quad (4)$$

($I, J = 1, 2, \dots, 6; j = r, \theta, z$)

式中： S_I 为应变； $d_{ij}^{(MS)}$ 为压磁系数； H_j 为磁场强度分量； S_{IJ}^H 为固定磁场下的弹性系数； σ_j 为应力分量； $d_{ij}^{(MS)}$ 可写作：

$$d_{ij}^{(MS)} = \left(\frac{\partial S_I}{\partial H_j} \right)_{|\sigma} \quad (5)$$

激发扭转导波时，偏置磁场沿圆周方向，当只有偏置磁场 H_θ 时，

$$\begin{cases} d_{2\theta}^{(MS)} = \left(\frac{\partial S_2}{\partial H_\theta} \right)_{|\sigma} \equiv \gamma \\ d_{1\theta}^{(MS)} = d_{3\theta}^{(MS)} = -\frac{1}{2}\gamma \\ d_{4\theta}^{(MS)} = d_{5\theta}^{(MS)} = d_{6\theta}^{(MS)} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中： γ 为材料磁致伸缩曲线的斜率。

施加动态磁场 H_z 后，与偏置磁场形成合磁场 H_t ，如图 7 所示。

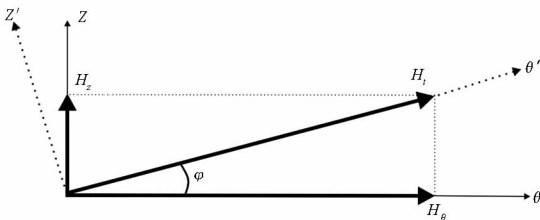


图 7 磁场示意图

Fig. 7 Sketch of the magnetic field

在 (r', θ', z') 坐标系下，应变可表示为：

$$\begin{cases} S'_2 = \varepsilon(H_t) \equiv \varepsilon_t \\ S'_1 = S'_3 = -\frac{1}{2}\varepsilon(H_t) = -\frac{1}{2}\varepsilon_t \\ S'_4 = S'_5 = S'_6 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中： ε_t 为总磁场 H_t 方向上的应变。

在原坐标系 (r, θ, z) 下时，应变张量的坐标变换式为 $\varepsilon'_{ij} = c\varepsilon_{kl}c^T$ ，其中

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (8)$$

得到原坐标系下应变与新坐标系下应变的关系为：

$$\begin{cases} S_1 = \varepsilon_{11} = \varepsilon'_{11} = S'_1 \\ S_2 = \varepsilon_{22} = S'_2 \cos^2\varphi + S'_3 \sin^2\varphi \\ S_3 = S'_2 \sin^2\varphi + S'_3 \cos^2\varphi \\ S_4 = \frac{1}{2}(S'_2 - S'_3) \sin 2\varphi \\ S_5 = S_6 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

则压磁系数为：

$$\begin{cases} d_{1z} = \frac{\partial S_1}{\partial H_z} = \frac{\partial S'_1}{\partial H_z} = -\frac{1}{2}\gamma \sin\varphi \\ d_{2z} = \gamma \sin\varphi (\cos^2\varphi - \frac{1}{2}\sin^2\varphi) - \frac{3\varepsilon_t}{H_o\theta} \sin\varphi \cos^3\varphi \\ d_{3z} = \gamma \sin\varphi (\sin^2\varphi - \frac{1}{2}\cos^2\varphi) + \frac{3\varepsilon_t}{H_o\theta} \sin\varphi \cos^3\varphi \\ d_{4z} = \frac{3}{4}\gamma \sin 2\varphi \sin\varphi + \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_t}{H_o\theta} \cos^2\varphi \cos 2\varphi \\ d_{5z} = d_{6z} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中， $H_o\theta$ 为 θ 方向偏置磁场大小。

对于 H_r 引起的压磁系数，按照类似计算方法，可得：

$$\begin{cases} d_{1r} = d_{3z} \\ d_{2r} = d_{2z} \\ d_{3r} = d_{1z} \\ d_{6r} = d_{4z} \\ d_{4r} = d_{5r} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

则压磁系数矩阵为：

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} d_{1r} & d_{1\theta} & d_{1z} \\ d_{2r} & d_{2\theta} & d_{2z} \\ d_{3r} & d_{3\theta} & d_{3z} \\ 0 & 0 & d_{4z} \\ 0 & 0 & 0 \\ d_{6r} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

在无应力状态下, $S_l = d_{ij} H_j$, 当偏置磁场远大于动态磁场, 可近似认为 $\varphi = 0$, 而铁钴条带一般很薄, 只考虑二维 (θ, z) 情况, 则铁钴条带中应变为:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{\theta\theta} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{\theta z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \gamma & 0 \\ 0 & -\frac{\gamma}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3\varepsilon_l}{2H_0\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_r \\ H_\theta \\ H_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

铁钴条带中应力为:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{\theta z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{\theta\theta} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{\theta z} \end{bmatrix} \quad (14)$$

由弹性力学平衡方程可得铁钴条带中的磁致伸缩力:

$$\begin{bmatrix} F_\theta^{(MS)} \\ F_z^{(MS)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: $F_\theta^{(MS)}$ 和 $F_z^{(MS)}$ 分别为铁钴条带中周向和轴向磁致伸缩力。

在磁致伸缩力的作用下, 铁钴条带产生振动, 通过耦合剂的作用带动管道振动, 从而在管道内产生导波。

3.2.2 接收模型

当导波遇到缺陷或管端后会发生反射, 反射回来的导波会带动铁钴条带的振动, 在静态偏置磁场的作用下产生动态磁场, 接收线圈感应该动态磁场产生电压, 从而实现导波的接收。

磁致伸缩逆效应本构方程为:

$$B_i = \mu_0 \mu_{ij}^S H_j + \tilde{e}_{ji}^{(MS)} S_j \quad (16)$$

($i, j = r, \theta, z; j = 1, 2, \dots, 6$)

式中: B_i 为磁感应强度; μ_0 为真空磁导率; μ_{ij}^S 为固定应变下的可逆磁导率; $\tilde{e}_{ji}^{(MS)}$ 为逆压磁系数。

则铁钴条带中的电流密度为:

$$\mathbf{J}_{Ms} = \nabla \times \mathbf{B} \quad (17)$$

式中: \mathbf{J}_{Ms} 为磁致伸缩电流密度; \mathbf{B} 为磁感应强度。

将式(17)代入式(2)可求得铁钴条带中的磁矢量位, 则线圈内感应电场为^[18]:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (18)$$

线圈中某点的电动势为:

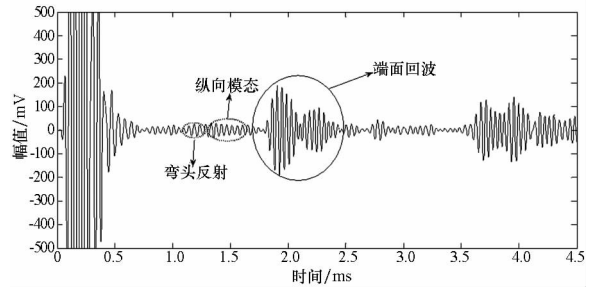
$$V_{\text{pout}} = \int_l \mathbf{E} d\mathbf{l} \quad (19)$$

则线圈的输出电压为:

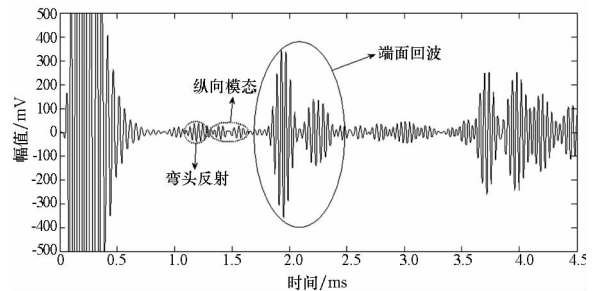
$$V_{\text{out}} = \frac{\int_\Omega V_{\text{pout}} d\Omega}{\int_\Omega d\Omega} \quad (20)$$

3.3 弯管实验检测

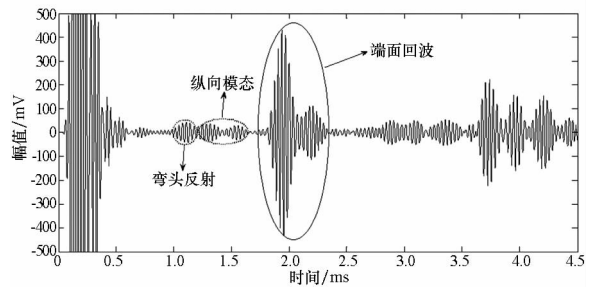
分别使用 22 kHz、25 kHz 和 33 kHz 的激励频率对弯管进行检测, 检测信号如图 8 所示。



(a) $f = 22$ kHz



(b) $f = 25$ kHz



(c) $f = 33$ kHz

图 8 导波检测信号

Fig. 8 Guided wave inspection signals

从图 8 中可以看出, 实验检测信号如模拟信号一样出现双端面回波现象, 验证了数值模拟的正确性。但是实验信号中只出现了轴对称的 $T(0,1)$ 模态导波, 未出现 $F(1,1)$ 模态导波, 这是由于铁钴条带轴对称分布, 由式(20)可知, 线圈中输出电压为线圈中各点电动势求和后取平均获得, $F(1,1)$ 模态导波信号相互抵消, 因而在检测

信号中并未出现 $F(1,1)$ 模态导波。检测信号中的 $T(0,1)$ 模态导波并不纯净,含有少量纵向模态导波,由式(15)可知,激励模型中铁钻条带中同时存在周向和轴向的磁致伸缩力,而轴向的磁致伸缩力是产生纵向模态导波的原因。因此,若想获得更为纯净的 $T(0,1)$ 模态导波还需要对传感器加以改进。

由图 8 可知,不同检测频率时,双端面回波的幅值比不同,由于第二个端面回波由模态转换产生,则该幅值比可表示模态转换程度的大小。分别计算各频率下第二个端面回波与第一个端面回波的幅值比,绘制幅值比随频率变化曲线,如图 9 所示。

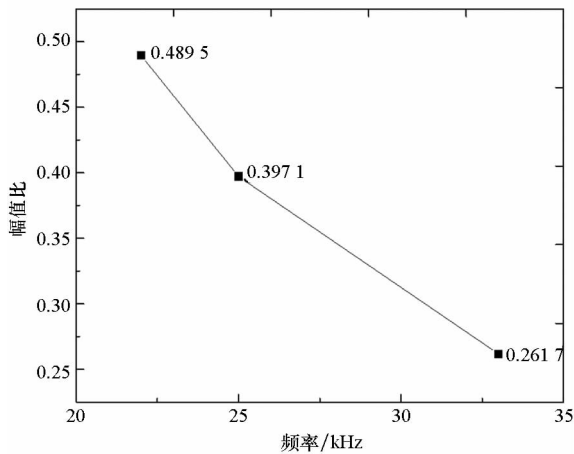


图 9 端面回波幅值比随频率变化曲线

Fig. 9 Ratios between end echo amplitudes changing with frequency

由图 9 可知,随着频率的增大,第二个端面回波与第一个端面回波的幅值比呈近似单调线性减小趋势。由此可分析,随着频率的增大, $T(0,1)$ 模态导波在弯头处的模态转换程度呈减小趋势。

4 结论

1) $T(0,1)$ 模态导波在小管径管道弯头处发生模态转换,部分 $T(0,1)$ 模态转换成 $F(1,1)$ 模态;无论弯头反射还是透射产生的 $F(1,1)$ 模态都具有方向性,其振动偏移方向垂直于弯头拱背-拱腹方向。

2) $T(0,1)$ 模态导波检测小管径弯管时产生的双端面反射现象,是由弯头处的模态转换造成的。当 $T(0,1)$ 模态导波穿过弯头后,因模态转换管道内会出现 $T(0,1)$ 模态和 $F(1,1)$ 模态两种模态导波,两种模态导波具有不同的传播速度,遇到管端依次反射,再次穿过弯头时会又一次发生模态转换,这样就造成了双端面反射现象。

3) 所提磁致伸缩扭转导波检测传感器能够在管道内激励出较为纯净的 $T(0,1)$ 模态导波,实验信号中未出现明显的 $F(1,1)$ 模态导波,因为接收线圈对导波信号进行了平均,使管道内 $F(1,1)$ 模态导波相互抵消;实验信号中出现少量的纵向模态导波,从磁致伸缩扭转导波激励模型中可知,该传感器会激发出轴向磁致伸缩力,因而会产生纵向模态导波。

4) 实验信号中同样出现了双端面回波现象,验证了有限元数值模拟结果的正确性。随着频率的增大,第二个端面回波与第一个端面回波幅值比呈减小趋势,这说明 $T(0,1)$ 模态导波在弯头处的模态转换程度呈减小趋势。

参考文献 (References)

- [1] Nishino H. A feasibility study on pipe inspection using ultrasonic guided waves for maintenance of nuclear power plants[C]//Proceedings of International Symposium on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants (ISaG2010), 2010: 184-198.
- [2] Furuhashi S, Sorimachi K, Sugiura T. Change in mode configurations and propagation velocity of guided waves through an elbow section of a pipe[C]//Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium, 2010: 2211-2214.
- [3] Miki M, Nagashima Y, Endou M, et al. Evaluation for defect detection over bending zone in piping by guided wave[C]//Proceedings of Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2010, 1211(1): 111-120.
- [4] Zhou W J, Ichchou M N. Wave propagation in mechanical waveguide with curved members using wave finite element solution[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199(33/34/35/36): 2099-2109.
- [5] Furukawa T, Komura I. Simulation and visualization of guided wave propagation by large-scale 3D FEM[J]. Journal of Advanced Maintenance, 2011, 3(3): 92-101.
- [6] El Bakkali M, Lhémy A, Baronian V, et al. A modal formulation for the propagation of guided waves in straight and curved pipes and the scattering at their junction[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 498(1): 012012.
- [7] Predoi M V, Petre C C. Guided waves scattering by discontinuities near pipe bends[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 133(5): 3328.
- [8] Sanderson R M, Hutchins D A, Billson D R, et al. The investigation of guided wave propagation around a pipe bend using an analytical modeling approach[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 133(3): 1404-1414.
- [9] Verma B, Mishra T K, Balasubramaniam K, et al. Interaction of low-frequency axisymmetric ultrasonic guided waves with bends in pipes of arbitrary bend angle and general bend radius[J]. Ultrasonics, 2014, 54(3): 801-808.
- [10] Brath A J, Simonetti F, Nagy P B, et al. Acoustic formulation of elastic guided wave propagation and scattering

- in curved tubular structures [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2014, 61(5): 815–829.
- [11] 罗更生, 谭建平, 卢超, 等. L(0,2)模态导波检测弯管缺陷的数值模拟和实验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(9): 3029–3036.
LUO Gengsheng, TAN Jianping, LU Chao, et al. Numerical simulation and testing research for defect detection in bend pipes using longitudinal mode L(0,2) [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(9): 3029–3036. (in Chinese)
- [12] 周邵萍, 张蒲根, 吕文超, 等. 基于导波的弯管裂纹缺陷的检测[J]. *机械工程学报*, 2015(6): 58–65.
ZHOU Shaoping, ZHANG Pugen, LYU Wenchao, et al. Detection of cracks in elbow pipes using guided waves[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015(6): 58–65. (in Chinese)
- [13] Ni J, Zhou S P, Zhang P G, et al. Effect of pipe bend configuration on guided waves-based defects detection; an experimental study [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2016, 138(2): 021203.
- [14] Qi M X, Zhou S P, Ni J, et al. Investigation on ultrasonic guided waves propagation in elbow pipe [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2016, 139/140: 250–255.
- [15] Catton P. Long range ultrasonic guided waves for the quantitative inspection of pipelines[D]. London, UK: Brunel University, 2009.
- [16] 孙鹏飞, 武新军, 从明. 磁致伸缩纵向导波管道检测数值建模与分析[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(6): 1250–1256.
SUN Pengfei, WU Xinjun, CONG Ming. Numerical modeling and analysis of the longitudinal guided wave pipe inspection based on magnetostrictive effect [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(6): 1250–1256. (in Chinese)
- [17] Hirao M, Ogi H. EMATs for science and industry[M]. New York: Springer US, 2003.
- [18] 黄松岭. 电磁超声导波理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
HUANG Songling. Theory and application of electromagnetic ultrasonic guided wave [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)