

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201810068



缺陷方向对磁致伸缩导波 检测敏感性影响分析

龙盛蓉¹, 黄永跃¹, 李志农¹, 徐长英², 淦文建¹

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063;

2. 南昌航空大学 工程训练中心, 江西 南昌 330063)

摘要: 采用有限元仿真与实验相结合的方法建立磁致伸缩导波管道检测平台,在待测管道上预置与周向分别呈 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的 10 个大小相同的槽型缺陷,依次利用 $L(0,2)$ 纵向模式导波和 $T(0,1)$ 扭转模式导波进行检测. 仿真和实验结果均表明: $L(0,2)$ 导波缺陷回波幅值随着缺陷角度增加而逐渐降低, 50° 时已经难以分辨出缺陷信号, $L(0,2)$ 导波适合检测 50° 以下缺陷; $T(0,1)$ 导波的缺陷幅值随着缺陷角度的增加先减小后增大,并且整体具有较高的信噪比, $T(0,1)$ 模式导波对各个方向的缺陷检测均有良好的适用性.

关键词: 磁致伸缩; 管道检测; 导波模式; 缺陷方向; 敏感性

中图分类号: TB 51; TG 115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)03-0312-07

Analysis on Sensitivity of Magnetostrictive Guided Wave Detection to Defect Direction

LONG Shengrong¹, HUANG Yongyue¹, LI Zhinong¹,
XU Changying², GAN Wenjian¹

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing Ministry of Education,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Engineering Training Center, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: A magnetostrictive guided wave pipeline inspection platform was established by means of finite element simulation and experiment. 10 grooved defects with the same size were preset on the pipeline. The angle between them and the circumference was from 0 to 90 degrees. $L(0,2)$ longitudinal mode guided waves and $T(0,1)$ torsional mode guided waves were used to conduct pipeline detection in turn. Both simulation and experimental results show that the amplitude of $L(0,2)$ guided wave defect echo decreases gradually with the increase of defect angle, and it is difficult to distinguish the defect signal when it is 50 degrees, which are more suitable for defect detection below 50 degrees; the defect amplitude of $T(0,1)$ guided wave decreases first and then increases with the increase of defect angle, and the signal-to-noise ratio is high, which have good applicability for defect detection in all directions.

收稿日期: 2017-03-29

通信作者: 龙盛蓉(1979-),女,博士,讲师,主要从事电磁检测和无损评价的研究. E-mail:lornalong@126.com.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFF0203000); 国家自然科学基金资助项目(51675258, 51261024); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ150699); 江西省自然科学基金资助项目(20171BAB206039); 教育部重点实验室开放基金资助项目(ZD201429003)

Keywords: magnetostriction; pipeline detection; guided wave mode; defect direction; sensitivity

磁致伸缩导波检测技术^[1-4]在继承传统导波优势的基础上,避免了其接触式检测的弊端,在目前导波检测研究中具有重要的地位.近年来,为了实现石油、化工传输管道的快速检测,学者针对磁致伸缩导波检测技术,从材料特性、检测仪器及检测方法与理论基础等方面开展研究.王秀彦等^[5]对单层管道中纵向导波模态进行分析,在研究导波传播中的频散和多模态特性的基础上,得出轴对称 $L(0,2)$ 模态的导波适于管道中的缺陷检测. Liu 等^[6]对纵向导波模式 $L(0,2)$ 研究,发现在特定频率范围内该模态导波不发生频散现象,同时,超声振动在整个管道壁中分布较均匀. Lowe 等^[7]利用中心频率为 70 kHz 的 $L(0,2)$ 模态对单层管道中的周向缺陷进行检测,得到该模态的缺陷反射系数曲线. 刘胜骆等^[8]采用建模与实验相结合方式,利用磁致伸缩超声导波检测长输管道,结果表明,其检测灵敏度能达到 1% 以上的截面变化量. Nakamura 等^[9]研究扭转模式 T 波在不同厚度管道中的模式转换特性,并得出扭转模态导波可检测出缺陷面积大于横断面 35% 的腐蚀缺陷的结论. Kim 等^[10]设计特定结构的磁致伸缩导波传感器,检测管道中的轴向及周向裂纹.然而,学者们在选择检测导波模态时,主要依据导波在传播过程中的频散特性及模态单一性^[11-12],并未考虑检测中导波模态与检测缺陷方向两者间相互作用与检测敏感度的影响,因而本文采用仿真和实验相结合的方法,研究缺陷角度对磁致伸缩纵向导波和扭转导波检测的敏感性影响,并从纵向模态导波和扭转模态导波振动特性的角度分析原因.

1 磁致伸缩导波的检测

1.1 磁致伸缩导波检测原理及实验平台

磁致伸缩导波检测依靠磁致伸缩效应^[13]发射和接收超声波^[14],即当铁磁性材料置于交变磁场环境中,并被磁化时,在材料中产生随磁场改变而变化的磁致伸缩应变.在铁磁体内激发出应力波,该弹性波沿构件方向传播即形成了导波.与此相对应,铁磁性材料在受到弹性波作用时,将产生逆磁致伸缩效应^[15],导致铁磁体内磁感应强度的变化.依据法拉第电磁感应定律,变化的磁场产生变化的电场,即磁感应强度的变化必然造成接收线圈电压的变化,从而实现机械振动量的转换测量.

磁致伸缩导波检测系统主要由检测主机、磁致伸缩导波激励和接收传感器及信号系统组成,装置示意图和搭建的现场实验平台分别如图 1,2 所示.图 1,2 中:待检测管道为 20# 钢;长度为 3 200 mm;外径为 102 mm;厚度为 4 mm.

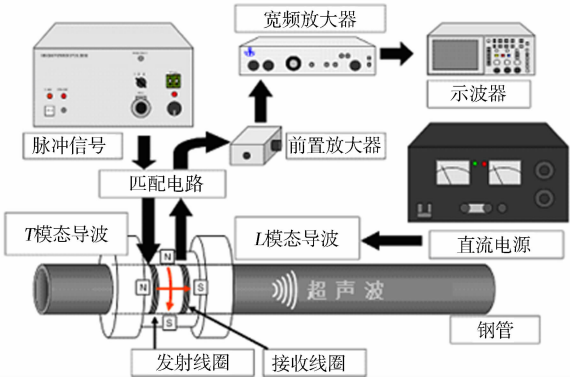
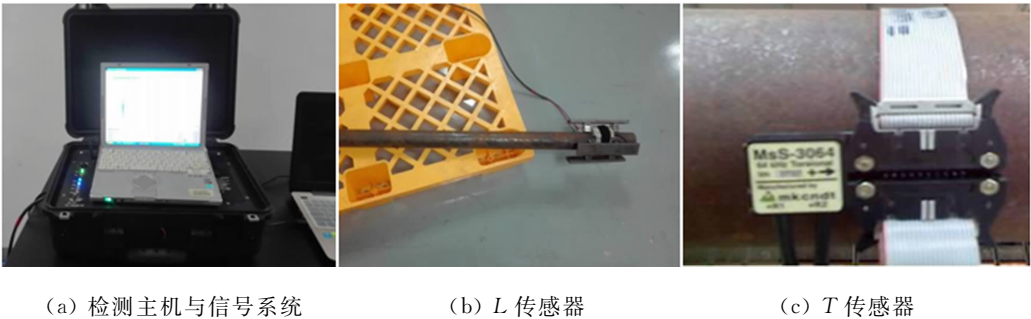


图 1 磁致伸缩导波实验装置

Fig. 1 Experiment equipment diagram of magnetostrictive waveguide



(a) 检测主机与信号系统 (b) L 传感器 (c) T 传感器

图 2 磁致伸缩导波现场实验平台

Fig. 2 Field experimental platform for magnetostrictive waveguide

管道材料特性参数,如表 1 所示.

表 1 管道材料特性参数

Tab. 1 Characteristics parameter of magnetostrictive materials

材料特性	数值	描述	材料特性	数值	描述	材料特性	数值	描述
E/GPa	211	杨氏模量	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7 850	密度	λ_s	4.17×10^{-6}	饱和磁致伸缩量
ν	0.286	泊松比	$\sigma/\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	1.32×10^7	电导率	$M_s/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$	1.5×10^6	饱和磁化强度

磁致伸缩纵态导波和扭转导波传感器均采用自发自收式探头,放置在距管道左端 100 mm 处. 信号发生器给予的激励信号经过功率放大器后,将其输入到激励线圈进行磁致伸缩导波的激励. 产生的导波经过接收装置产生相应感应电压信号,并将输出到计算机上进行显示.

1.2 磁致伸缩导波检测仿真模型

磁致伸缩导波几何模型,如图 3 所示. 与实验平台相对应,磁致伸缩导波模型主要由动态磁场、静态偏置磁场^[16-21]、管道和空气域 4 部分组成. 其中,空气域用长度为 3 400 mm,半径为 80 mm 的圆柱体代替;动态磁场由交变线圈产生;纵向模态导波的静态偏置磁场是由一直流螺线管线圈组成(图 3(a)),动态线圈和静态偏置磁场皆沿管道轴向方向;扭转模态的动态交变线圈外径为 114 mm,静态偏置磁场是由贴于管道外侧的矩形镍片组成(图 3(b)),镍片外径为 110 mm,对其沿长度方向进行磁化,使其处在偏置静态磁场的周向磁化状态下. 相关材料属性设置如下:空气域的相对磁导率和介电常数为 1;线圈为铜线绕制;相对磁导率和相对介电常数为 1;电导率为 $5.998\times10^7\text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$.

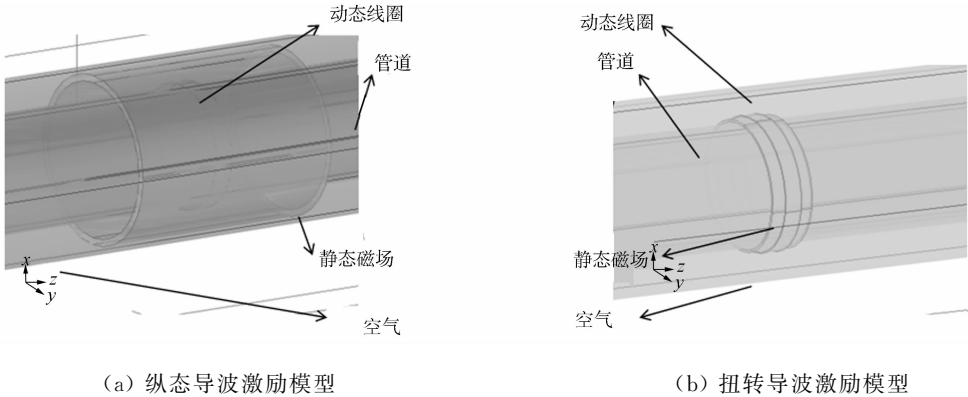


图 3 磁致伸缩导波几何模型

Fig. 3 Geometric model of magnetostrictive guided wave

动态线圈中所加载的激励信号(i)表达式为

$$i = 0.5I\sin(2\pi ft)\left[1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{6}\right)\right].$$

上式中: I 为电流大小,A; f 为激励频率,kHz.

管道群速度与相速度,如图 4 所示. 图 4 中:磁致伸缩纵向模态导波 $L(0,2)$ 在 100 kHz 下群速度为 $5\,234\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;扭转模态导波 $T(0,1)$ 在 100 kHz 下群速度为 $3\,138\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

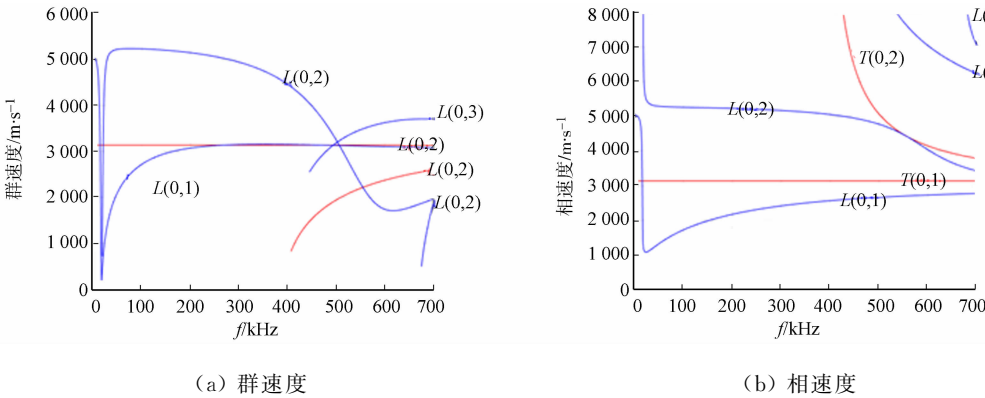


图 4 管道群速度与相速度

Fig. 4 Group velocity and phase velocity of pipe

选择动态线圈激励信号频率为 100 kHz, 电流为 2 A, 匝数为 40. 纵向模型中静态线圈匝数为 200 匝. 取有限元模型中管道上靠近传感器的任一质点为研究对象, 通过仿真计算得到 100 kHz 下纵向导波和扭转导波管道中位移图, 如图 5 所示. 图 5 中: s 为位移. 由图 5(a) 中可知: 轴向位移比径向位移大一个数量级, 周向位移基本为零, 可判断在管道中激励的为纵向导波. 由图 5(b) 可知: 周向位移最大, 比轴向位移和径向位移大一个数量级, 可判断在管道中激励的导波为扭转导波.

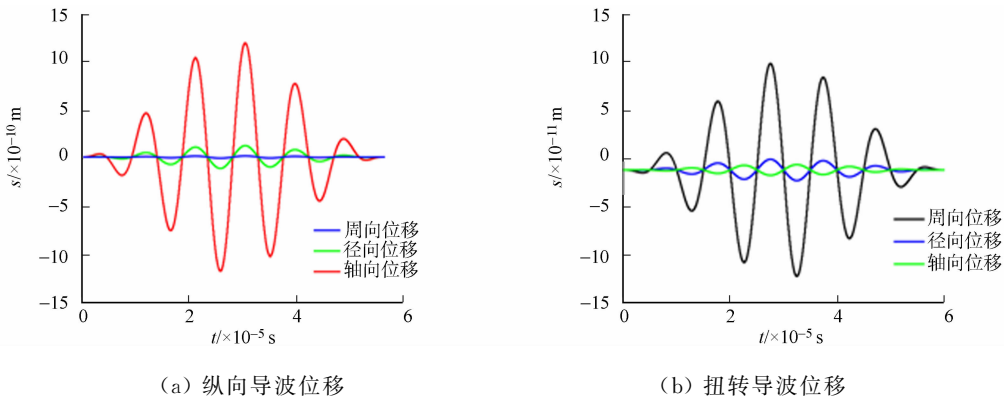
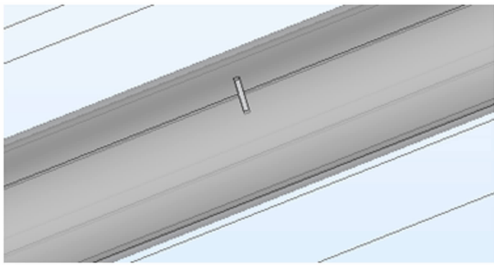


图 5 磁致伸缩导波传感器模型位移图

Fig. 5 Displacement map of magnetostrictive guided wave sensor

1.3 研究对象

在检测过程中, 为了分析 $L(0, 2)$ 及 $T(0, 1)$ 模态导波对管道上不同方向缺陷检测的效果, 设置相关检测试样, 如图 6 所示. 图 6 中: 缺陷中心点为槽型通透性缺陷, 位置位于距管左端 1 100 mm 处, 其长度为 25 mm, 宽度为 4 mm; 初始缺陷为周向缺陷, 在待测管道上预置与周向分别呈 $0^\circ \sim 90^\circ$ (依次间隔 10°) 的 10 个大小相同的槽型缺陷.



(a) 仿真模型缺陷



(b) 实验管道缺陷

图 6 管道初始周向缺陷

Fig. 6 Pipe initial circumferential defect

2 不同角度缺陷导波检测

2.1 实验数据

采用节 1.1 所搭建实验检测平台, 分别利用 T 波激励探头及 L 波激励探头对定制试样进行检测, 探头均放置于距离管道左端 100 mm 处. 通过分析频散曲线, 确定激励频率为 100 kHz. 针对不同角度对象, 对 $0^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ 和 90° 4 个典型缺陷幅值进行放大, 检测结果如图 7 所示.

通过提取上述检测结果的缺陷回波幅值信号可知: 对于 L 模态导波, 随着缺陷角度的增大, 缺陷信号幅值不断下降; 当缺陷与周向呈 0° 时, 幅值最大; 50° 时缺陷信号变得极其微弱, 基本难以分辨出该信号; 超过 50° 后, 缺陷回波信号完全淹没在噪声中. 因此, L 模态导波不适宜检测与周向呈大角度的缺陷, 其检测范围在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 左右; 对于 T 模态导波, 随着缺陷角度的增大, 其幅值先减小后又增大, 40° 时达到最小值, 但仍可分辨出缺陷回波信号.

2.2 仿真研究结果

为了研究缺陷角度与导波模态对检测效果的影响, 以前文所建立的数值仿真模型为基础, 设计 10

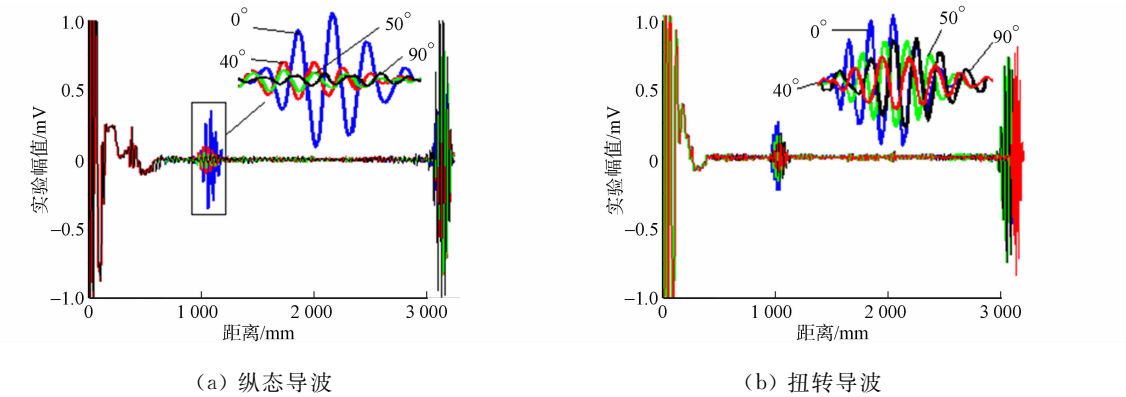


图 7 缺陷回波实验信号
Fig. 7 Defect echo experimental signal

个裂纹类缺陷. 该缺陷大小保持相等, 但与管道轴向夹角均按照间隔 10° 沿管道径向依次递增. 在管道端部接收端提取任意一节点的振幅为接收信号, 可得到 L 及 T 模态导波检测回波信号, 分别如图 8(a), (b) 所示.

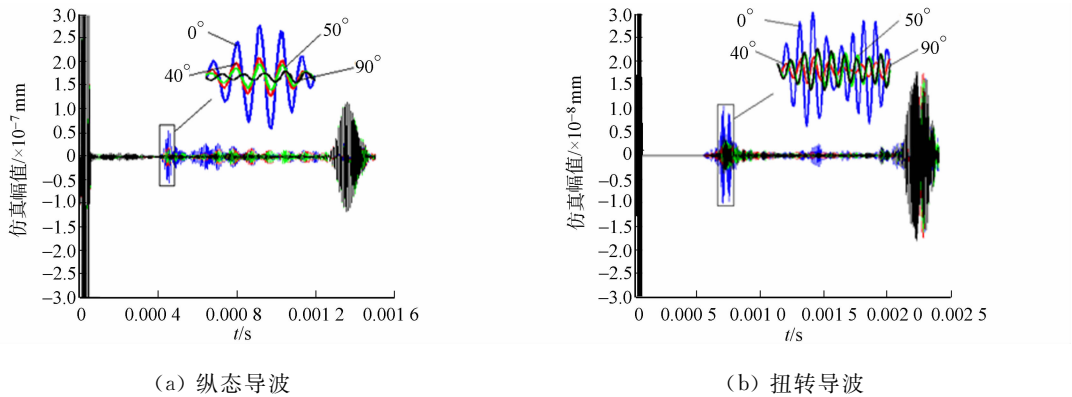


图 8 缺陷回波仿真信号
Fig. 8 Rotating echo signal of defect along axial direction of pipe

通过分析仿真和实验回波信号图可以得出: 仿真和实验结果具有较好的一致性, 二者相互印证. 对于 L 模态导波, 随着缺陷角度的增大, 缺陷信号幅值不断下降, 并且逐渐被噪声淹没; 而 T 模态导波, 随着缺陷角度的增大, 其幅值先减小后又增大, 40° 时达到最小值, 却依然可以分辨出缺陷信号.

3 缺陷方向对磁致伸缩导波检测的敏感度

3.1 检测结果

通过数值仿真和实验研究两种方法研究 $L(0,2)$ 和 $T(0,1)$ 两种不同模态导波在检测不同方向缺陷时的检测效果, 为直观看到在一定缺陷角度下, 此两种模态导波对缺陷检测的优劣程度, 现将缺陷回波幅值与端面回波幅值之比定义为检测敏感度. 根据上文检测信号幅值及端面回波幅值, 绘制出两种模态导波检测敏感度随缺陷角度变化图, 如图 9 所示.

由图 9 可知: $L(0,2)$ 模态的检测敏感度随缺陷角度增加而一直减小, $T(0,1)$ 模态的检测敏感度则随着缺陷角度增加先减小后增大; 在 $0^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 时, $L(0,2)$ 的检测敏感度整体高于 $T(0,1)$ 模态, 此时, $L(0,2)$ 和 $T(0,1)$ 模态对缺陷均有较高的检测敏感度; 而在缺陷角度超过 40° 以后, $T(0,1)$ 模态的检测敏感度逐渐高于 $L(0,2)$ 模态; 值得注意的是, 尤其是超过 50°

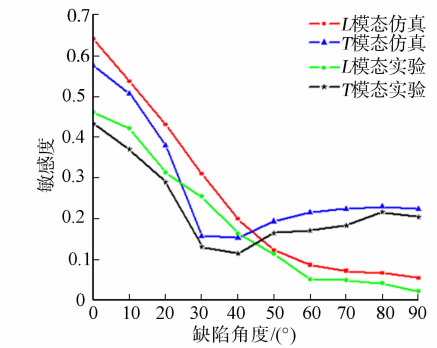


图 9 两种模态导波检测灵敏度随缺陷角度的变化
Fig. 9 Sensitivity of two modes of guided wave detection varies with defect angle

以后, $L(0,2)$ 模态的检测敏感度极低, 而 $T(0,1)$ 模态仍具有较高的检测敏感度. 分析缺陷反射信号可发现, 当敏感度小于 0.1 时, 缺陷即不能被识别. 由此可见, $T(0,1)$ 模态导波对各个方向的缺陷检测均有良好的适用性, 而 $L(0,2)$ 模态导波比较适合于 50° 以下缺陷的检测.

3.2 原因探究

对于 $L(0,2)$ 模态, 其波形的振动表现形式为轴向振动, 波的传播方向也沿管道轴向方向向前传播, 其振动特性, 如图 10(a) 所示. 导波检测识别缺陷的依据是波遇到缺陷时产生的反射信号, 导波与缺陷接触面积越大其反射信号越强. 当缺陷沿周向分布时, 其与纵向模态导波的接触面积最大, 因而检测效果最好; 反之, 缺陷沿轴向分布时, 其检测效果较差. 对于 $T(0,1)$ 模态, 振动特性如图 10(b) 所示, 其波形的振动表现形式为周向振动, 而波的传播方向沿管道轴向方向传播, 因此, 扭转模态导波对轴向缺陷也可进行较好地识别.

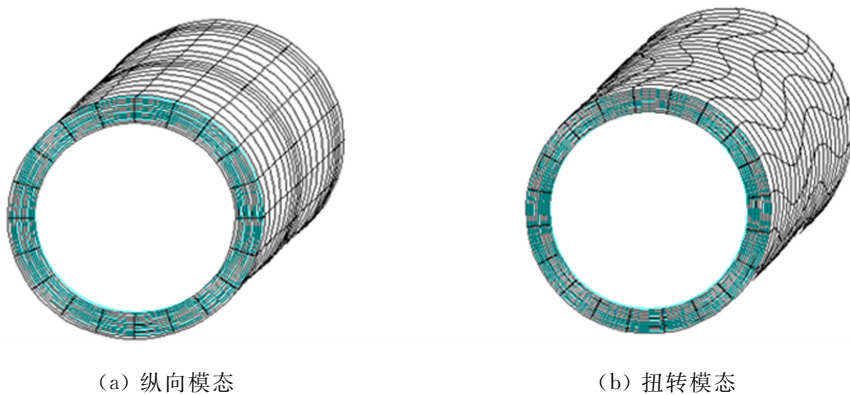


图 10 导波振动特性

Fig. 10 Guided wave vibration characteristics

4 结束语

结合实验研究与数值仿真方法, 分析管道中缺陷方向与导波检测模态之间的相互关系, 研究得出: 在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 时, $L(0,2)$ 和 $T(0,1)$ 模态均有较高的敏感性, 但 $L(0,2)$ 的检测敏感度整体高于 $T(0,1)$ 模态; 当缺陷角度超过 40° 直至 50° 以后, $T(0,1)$ 模态检测敏感度逐渐高于 $L(0,2)$ 模态, 且此时 $L(0,2)$ 模态的检测敏感度极低, 而 $T(0,1)$ 模态仍具有较高的检测敏感度. 通过分析不同模态导波的振动特性, 从而得出 $T(0,1)$ 模态导波对各个方向的缺陷检测均有良好的适用性, 而 $L(0,2)$ 模态导波较适合检测 50° 以下缺陷.

参考文献:

- [1] 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. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1702867.
- [2] TANG Mingxi, WU Xinjun, CONG Ming, *et al.* A method based on SVD for detecting the defect using the magnetostrictive guided wave technique[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 70/71: 601-612. DOI: 10.1016/j.ymsp.2015.09.018.
- [3] 龙盛蓉. 管道磁致伸缩导波检测机理及传播特性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- [4] 李志农, 孟宁, 龙盛蓉. 激励频率对扭转模态磁致伸缩导波检测性能影响[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 632-637. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201610030.
- [5] 王秀彦, 王智, 焦敬品, 等. 超声导波在管中传播的理论分析与试验研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 11-16. DOI: 10.3321/j.issn:0577-6686.2004.01.003.
- [6] LIU Zenghua, XIE Xiaodong, WU Bingao, *et al.* The application of low frequency longitudinal guided wave mode for the inspection of multi-hole steel floral pipes[J]. Journal of Physics (Conference Series), 2012, 353(1): 12-13. DOI: 10.1088/1742-6596/353/1/012013.
- [7] LOWE M, ALLEYNE D, CAW L P. Defect detection in pipes using guided waves[J]. Ultrasonics, 1998, 36: 147-

154. DOI:10.1016/S0041-624X(97)00038-3.
- [8] 刘胜骆, 苏军. 基于超声导波技术的长输管道无损检测[J]. 无损检测, 2015, 37(6): 40-42. DOI: 10.11973/wsje201506010.
- [9] NAKAMURA N, OGI H, HIRAO M. Mode conversion and total reflection of torsional waves for pipe inspection[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2013, 52(7): 7-14. DOI: 10.7567/JJAP.52.07HC14.
- [10] KIM H W, KWON Y E, CHO S H, *et al.* Shear-horizontal wave-based pipe damage inspection by arrays of segmented magnetostrictive patches[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2011, 58(12): 2689-2698. DOI: 10.1109/TUFFC.2011.2131.
- [11] GREIL M, POOHSI A, CHANDARANA N. Guided wave propagation and damage detection in composite pipes using piezoelectric sensors[J]. Procedia Engineering, 2017, 188: 148-155. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.468.
- [12] HERDOVICS B, CEGLA F. Structural health monitoring using torsional guided wave electromagnetic acoustic transducers[J]. Structural Health Monitoring, 2018, 17(1): 24-38. DOI: 10.1177/1475921716682688.
- [13] JOULE J R. On the effects of magnetism upon the dimensions of iron and steel bars[J]. Philosophical Magazine, 1847, 30(199): 76-87, 225-241. DOI: 10.1080/14786444708645656.
- [14] 孟宁. 架空压力弯管的超声导波检测技术研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017. DOI: CNKI:CDMD:2.1017.711463.
- [15] VILLARI E. Ueber die aenderungen des magnetischen moments, welche der zug und das hindurchleiten eines galvanischen stroms in einem stabe von stahl oder eisen hervorbringen[J]. Annalen Der Physik, 2010, 202(9): 87-122. DOI: 10.1002/andp.18652020906.
- [16] LONG Shengrong, ZHONG Yuning, LIU Ying, *et al.* Effect of homogeneous bias magnetic field on output characteristics of magnetostrictive waveguide sensor[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014(2): 390-394. DOI: 10.7623/syxb201402023.
- [17] LIU Zenghua, ZHANG Yinong, WU Bingao. Research on finite element simulation in bias magnetic field of the magnetostrictive sensor used for steel strands[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(2): 281-289. DOI: 10.1360/972008-2465.
- [18] 焦敬品, 刘伟, 马庆增, 等. 偏置磁场对磁致伸缩纵向导波换能器效能的影响研究[J]. 实验力学, 2013, 28(5): 563-571. DOI: 10.7520/1001-4888-12-168.
- [19] VINOGRADOV S, COBB A, BARTLETT J, *et al.* Development of a novel omnidirectional magnetostrictive transducer for plate applications[J]. American Institute of Physics Conference Series, 2018, 1949(1): 090002. DOI: 10.1063/1.5031565.
- [20] 魏争, 黄松岭, 赵伟, 等. 磁致伸缩管道缺陷超声导波检测系统研制[J]. 电测与仪表, 2013, 50(9): 21-25, 104. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1390.2013.09.005.
- [21] 孙永, 徐江, 周金海, 等. 磁致伸缩导波传感器换能效率估计方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1705-1713. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2017.07.018.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)