

8-13-2020

Finite Element Simulation of Ultrasonic Guided Wave to Detect Through-type Defects in Pipe

Hongwei Hu

1. College of Automobile and Mechanical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;;2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

Zexiang Wang

1. College of Automobile and Mechanical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;;

Guangkai Sun

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

Peng Gang

1. College of Automobile and Mechanical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Finite Element Simulation of Ultrasonic Guided Wave to Detect Through-type Defects in Pipe

Abstract

Abstract: To get the relationship between the defects and ultrasonic guided wave, the dispersion characteristic of guided wave in pipe was studied. *Then the finite element model of a pipe with a through-type defect was established. Taking the axial and circumferential defects with different sizes as research objects, the relationship between the defect location and defect size with the ultrasonic guided wave reflection coefficients was studied, using a control variable method, by finite element simulation.* The results show that there is a linear relationship between the circumferential sizes of the defect and the reflection coefficients for through-type defects when the L (0,2) and T (0,1) guided wave are used, and the axial position and circumferential size of the defect can be detected respectively by the defect echo position and amplitude values. The study provides a reference for sizing and locating of defects in pipe.

Keywords

guided wave detection, through-type defects, finite element simulation, dispersion characteristic

Recommended Citation

Hu Hongwei, Wang Zexiang, Sun Guangkai, Peng Gang. Finite Element Simulation of Ultrasonic Guided Wave to Detect Through-type Defects in Pipe[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(11): 2777-2783.

管道通透型缺陷的超声导波检测有限元仿真

胡宏伟^{1,2}, 王泽湘¹, 孙广开², 彭刚¹

(1.长沙理工大学汽车与机械工程学院, 长沙 410114; 2.北京航空航天大学机械工程与自动化学院, 北京 100191)

摘要: 为获取管道缺陷与超声导波的作用规律, 研究了导波在管道传播的频散特性, 建立了含通透型缺陷的管道有限元模型, 以不同尺寸的轴向缺陷和周向缺陷为对象, 采用控制变量法, 通过有限元仿真研究了缺陷位置、尺寸与超声导波反射系数的关系。结果表明采用 L(0,2)和 T(0,1)模态导波检测时, 缺陷的周向大小与反射系数存在线性关系, 通过缺陷回波位置和回波幅值能分别确定缺陷的轴向位置及周向大小, 为管道导波检测的缺陷定量与定位提供了有益参考。

关键词: 导波检测; 通透型缺陷; 有限元仿真; 频散特性

中图分类号: TB551

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2016)11-2777-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201611019

Finite Element Simulation of Ultrasonic Guided Wave to Detect Through-type Defects in Pipe

Hu Hongwei^{1,2}, Wang Zexiang¹, Sun Guangkai², Peng Gang¹

(1. College of Automobile and Mechanical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To get the relationship between the defects and ultrasonic guided wave, the dispersion characteristic of guided wave in pipe was studied. Then the finite element model of a pipe with a through-type defect was established. Taking the axial and circumferential defects with different sizes as research objects, the relationship between the defect location and defect size with the ultrasonic guided wave reflection coefficients was studied, using a control variable method, by finite element simulation. The results show that there is a linear relationship between the circumferential sizes of the defect and the reflection coefficients for through-type defects when the L(0,2) and T(0,1) guided wave are used, and the axial position and circumferential size of the defect can be detected respectively by the defect echo position and amplitude values. The study provides a reference for sizing and locating of defects in pipe.

Keywords: guided wave detection; through-type defects; finite element simulation; dispersion characteristic

引言

管道在石油化工行业应用广泛, 受制造工艺和工作环境的影响, 极易产生腐蚀、裂纹等各种缺陷。

如何快速检测并实现缺陷的定量定位, 对保障管道的安全使用具有重要意义。目前, 在管道检测方面, 有激光检测技术、涡流检测法、电磁超声检测法、漏磁爬机检测和超声导波检测等方法^[1], 其中超声导波检测距离长、检测时间短, 在长距离管道检测上具有技术优势, 采用超声导波检测能在保证检测精度的同时大大提高检测效率^[2]。然而针对石油化工管道的实际检测, 受导波频散特性及在管道传播中的多模态性影响^[3-4], 使得管道导波检测及缺陷



收稿日期: 2015-02-10 修回日期: 2015-08-24;
基金项目: 国家自然科学基金(51205031); 湖南省自然科学基金(2015JJ4004); 湖南省高校创新平台开放基金(14K003);
作者简介: 胡宏伟(1980-), 男, 安徽旌德, 博士, 副教授, 研究方向为无损检测及信号处理。

<http://www.china-simulation.com>

• 2777 •

评价变得复杂,通过数值仿真方法研究导波在管道中的传播特性,对超声导波检测技术的实际应用具有重要意义^[5]。

何存富等^[6]通过求解频散曲线方程并结合 Fourier 分解法,获得了导波在管道中的传播及其频散特性,为导波的数值模拟提供了理论基础。王悦民等^[7]研究了各模态导波在不同材料管道中的传播特性。Carandente R 等^[8]对不同类型缺陷的管道进行研究,发现缺陷角度等因素会对缺陷反射系数产生影响。董为容等^[9]通过数值模拟研究了管道腐蚀缺陷与导波反射系数之间的关系,但只对 L(0,2)模态导波进行了研究。Zheng M F 等^[10]认为采用 T(0,1)模态导波检测时灵敏度更高。在这些研究基础上,为深入研究管道缺陷与导波的作用规律,获取管道缺陷的导波检测的定量定位方法,有必要对管道超声导波进行进一步数值仿真研究。

本文根据石油化工管道中各模态导波的频散特性选择 T(0,1)和 L(0,2)两种模态导波,通过汉宁窗调制函数模拟导波激励信号,建立管道导波检测的有限元模型,通过有限元软件 ANSYS 仿真导波在管道中的传播过程。通过仿真研究管道缺陷的轴向定位方法,分析缺陷轴向、周向尺寸与反射系数间的关系,获取石油化工管道中超声导波缺陷响应规律及定量方法。

1 管道超声导波检测理论

1.1 管道中导波传播波动方程

导波在管道中按照其传播模式可分为轴对称纵向模态 L(0, m)、轴对称扭转模态 T(0, m)和非轴对称模态 F(n, m), n 表示周向阶数, m 表示模数^[11]。假设管道为各向同性的弹性介质且其长度为无限长,参考弹性力学理论,管道内节点运动必须满足 Navier 位移方程^[12],可通过位移场表征导波在管道中的传播:

$$\mu \cdot \nabla^2 \cdot u + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot u) = \rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \quad (1)$$

式中: μ 和 λ 表示拉梅常数; ∇^2 表示三维拉普拉

斯算子; u 表示位移场; ρ 表示材料密度。

通过 Helmholtz 分解定律,可将位移场 μ 分解为压缩标量势 φ 和等容标量势 ψ , 据此将式(1)中的位移方程转化为势函数方程:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left[(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \cdot \varphi - \rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \right] + \\ \nabla \cdot \left[\mu \cdot \nabla^2 \cdot \psi - \rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \right] = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

继续对式(2)进行 Helmholtz 分解,可获得管道中包含势函数的波动方程:

$$\nabla^2 \cdot \varphi = \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}, \quad \nabla^2 \cdot \psi = \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (3)$$

式中: c_p 表示膨胀波波速; c_s 表示旋转波波速。

1.2 管道中模态导波的选择

管道周围为自由边界即为真空,可知导波在管道中传播的边界条件为:

$$\sigma_{rR} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0 \quad (r = a, r = b) \quad (4)$$

式中: a, b 分别表示管道的内外径; R, z, θ 分别表示沿管道周向、径向和轴向。

通过包含势函数的波动方程及管道周围的边界条件可获得不同模态导波在管道中的频散方程,求解该频散方程可得扭转模态时导波频散方程^[13]为:

$$\begin{vmatrix} C_{23} & C_{26} \\ C_{53} & C_{56} \end{vmatrix} = 0 \quad (5)$$

纵向模态时导波频散方程为:

$$\begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{14} & C_{15} \\ C_{31} & C_{32} & C_{34} & C_{35} \\ C_{41} & C_{42} & C_{44} & C_{45} \\ C_{61} & C_{62} & C_{64} & C_{65} \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

以上式中 C_{ij} 表示频散方程各项元素的贝塞尔函数表达式。

根据本文仿真的管道直径及管壁厚度等参数,通过对上述频散方程求解^[14],可获得各模态导波在管道中传播频散特性的变化规律:对于纵向轴对

称模态导波, 其中 $L(0, 1)$ 模态导波群速度在 0~20 KHz 时逐渐趋近为 0, 在高于 20 KHz 的频域内群速度逐渐增大, 导致在整个频域内频散现象严重; 而 $L(0, 2)$ 模态导波群速度在 40 KHz 后维持在一个最大值, 在管道中传播时基本不会产生频散现象。对于扭转轴对称导波, 其中 $T(0, 1)$ 模态导波在整个频域内, 其群速度都保持不变, 传播时不会产生频散现象。据此, 本文选择 70 KHz 的 $L(0, 2)$ 模态导波和 40 KHz 的 $T(0, 1)$ 模态导波进行仿真研究。

1.3 管道缺陷的定位

管道中各模态导波传播速度只与管道材料有关, 根据缺陷回波信号位置可对缺陷轴向位置定位。在管道中纵向模态导波 c_l 和扭转模态导波 c_t 传播速度分别为:

$$c_l = \sqrt{e/[\rho(1-\nu^2)]}, \quad c_t = \sqrt{e/[2\rho(1+\nu)]} \quad (7)$$

式中 e 表示弹性模量, ρ 表示密度。

激励信号从管道左端施加, 信号接收端在位于距左端 l_1 位置, 设表面回波与缺陷回波之间的时间差为 t 。采用纵向模态检测时, 缺陷的轴向位置为:

$$l = 0.5c_l t + l_1 \quad (8)$$

采用扭转模态检测时, 缺陷的轴向位置为:

$$l = 0.5c_t t + l_1 \quad (9)$$

2 管道有限元仿真过程

2.1 管道有限元建模

管道材料数据如表 1 所示, 据此在 ANSYS 中建立管道几何模型, 采用 solid45 单元对几何模型进行网格划分, 建立管道结构的有限元模型如图 1 所示, 该模型有 98 256 个节点, 49 036 个单元。

为保证在进行有限元仿真时, 超声导波至少能被接收一次, 管道长度 $d_{\min} \geq 2v_g t$, 式中 v_g 表示群速度, t 表示脉冲激励信号周期; 为保证仿真精度, 在进行网格划分时, 必须控制单元大小, 最大单元长度 $l_{\max} = \lambda/8$, 式中 λ 表示波长; 为保证每个时间步长在一个单元内, 需控制时间步长 $t_{\max} \leq 0.8/v_g$ [15]。

表 1 管道及缺陷仿真参数

外径 /mm	内径 /mm	长度 /m	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /(kg/m ³)
100	95	1	211	0.28	7860

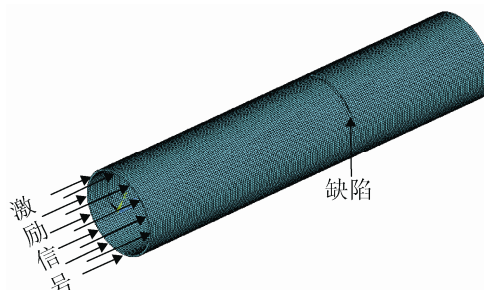


图 1 管道结构的有限元模型

2.2 激励信号模拟与加载

汉宁窗调制能抑制频散现象, 使得导波传播远距离后依然保持较高的能量, 且调制后信号的幅值变化与压电晶片振动过程相似。据此模拟 $L(0, 2)$ 模态导波检测管道时, 激励信号采用 10 周期汉宁窗调制正弦单音频信号, 模拟 $T(0, 1)$ 模态导波检测管道时, 激励信号采用 5 周期汉宁窗调制正弦单音频信号。汉宁窗调制函数为:

$$x(t) = 0.5(1 - \cos(\frac{2\pi ft}{n})) \cdot \sin(2\pi ft) \quad (10)$$

式中: f 表示激励信号频率; n 表示激励信号周期; t 表示时间间隔。

根据式(6), 以 f 为 70 KHz, n 为 10 的 $x(t)$ 作为 $L(0, 2)$ 模态导波的激励信号, 以 f 为 40 KHz, n 为 5 的 $x(t)$ 作为 $T(0, 1)$ 模态导波的激励信号。仿真过程采用瞬态动力学分析方法, 激励信号如图 1 所示施加在管道的左端面, 通过位移表征应力波在管道中的传播。受导波模态影响, 对于纵向模态导波 $L(0, 2)$, 其施加载荷的位移方向与导波传播方向一致, 而对于扭转模态导波 $T(0, 1)$, 其施加载荷的位移方向垂直于导波的传播方向。瞬态动力学分析中有完全法、缩减法及模态叠加法三种求解方法, 本文采用完全法进行求解, 虽然增加了计算所需时间, 但能施加非零位移载荷, 且可设定自动时间步长。

2.3 边界条件分析

为简化数值模拟计算过程,提高分析效率,重点研究缺陷位置、缺陷尺寸与超声导波反射系数的关系。本文模拟导波在管道中传播时处于自由边界即真空,在自由边界下,不需要考虑管道内外包围的介质,建立关于该介质的数学物理模型,进行数值模拟时计算量小。

激励信号在管道中加载及传播时,管道内外表面均为自由边界,不需要对管道内外表面进行约束。然而对于管道两端,当激励信号如图 1 所示施加在管道的左端面时,应将左端面设定为自由边界,对右端面全部节点施加全自由度的零位移约束,模拟刚性结构;当激励信号在管道中传播时,管道两端节点应全部模拟刚性结构,确保准确模拟导波信号在管道中的传播。

3 有限元仿真结果分析

对图 1 示有限元模型施加激励载荷,获得如图 2 所示频率 70 KHz 的 L(0, 2)模态导波在管道中的传播云图。管道中缺陷为通透型缺陷,其周向大小为 40%(缺陷周向尺寸与管道周长之比,后同),轴向大小为 100%(缺陷轴向尺寸与波长之比,后同),云图显示为 0.000 211 s 时导波在管道中的传播情况,此时导波在缺陷处产生缺陷回波,并反射至管道左端的信号接收端。

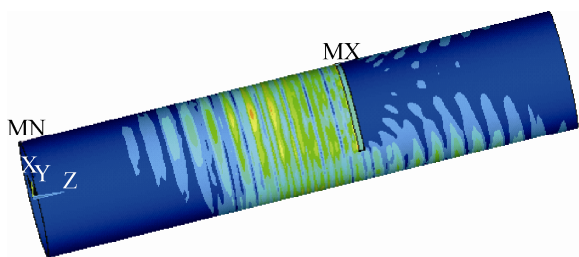
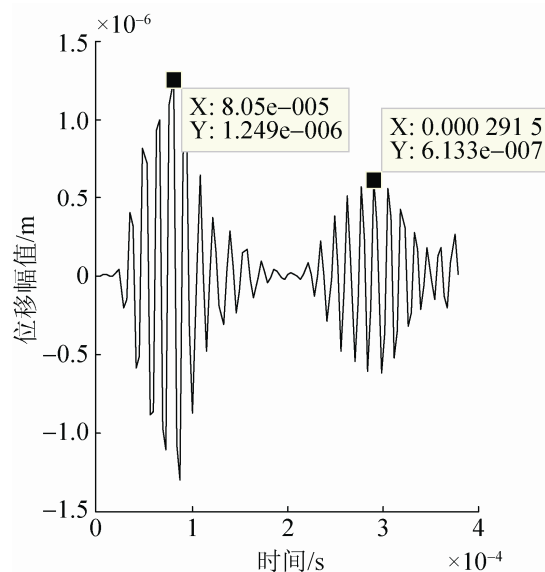


图 2 L(0,2)模态导波管道传播云图

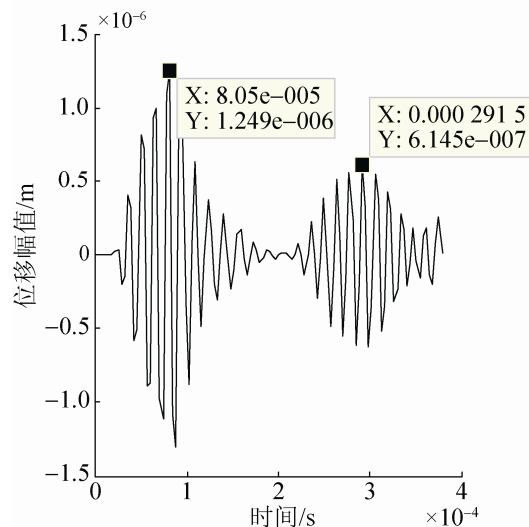
3.1 缺陷的轴向定位及尺寸定量仿真分析

图 3 表示缺陷周向尺寸为 50%时,不同轴向尺寸缺陷对应的 L(0, 2)模态导波和 T(0, 1)模态导波

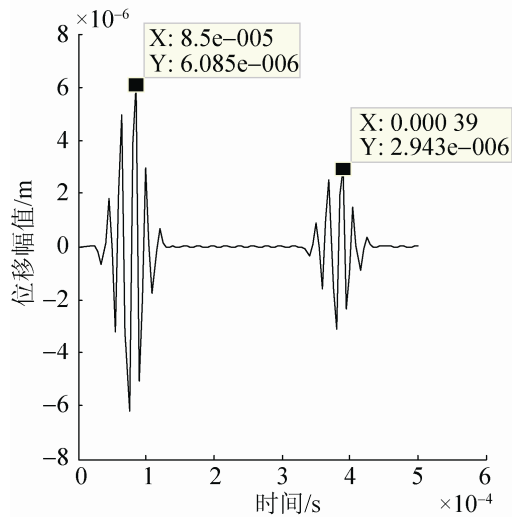
的接收回波信号。分析 L(0, 2)模态导波回波信号,其入射回波与缺陷回波信号之间的时间差为 0.000 211 s,根据杨氏模量计算得该材料中横波速度为 5 290 m/s,通过拟合波速,由上述缺陷轴向定位理论,其仿真结果获得的缺陷轴向位置为 0.65 m 处,仿真结果与实际结果误差为 8.3%。采用同样方法计算获得 T(0, 1)模态导波检测时,仿真结果获得的缺陷轴向位置为 0.62 m 处,仿真结果与实际结果误差为 3.3%。



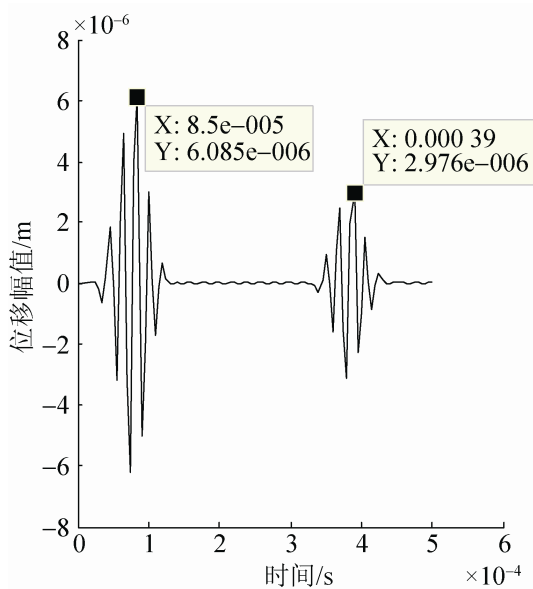
(a) 轴向缺陷 100% L(0,2)回波



(b) 轴向缺陷 150% L(0,2)回波



(c) 轴向缺陷 100% T(0,1)回波



(d) 轴向缺陷 150% T(0,1)回波

图 3 不同轴向缺陷尺寸时 L(0,2)及 T(0,1)模态导波回波信号

采用控制变量法对比不同管道通透型缺陷与反射系数的关系, 其中反射系数表示缺陷反射声压与入射声压之比, 当缺陷周向尺寸为 50%时, 设置缺陷轴向尺寸分别为 50%, 75%, 100%, 125%, 150%。由上图接收回波信号计算对应反射系数绘制如图 4 所示, 可知, 采用 L(0,2)模态导波和 T(0,1)模态导波检测时, 对于管道通透型缺陷, 当缺陷周向尺寸一定时, 缺陷轴向尺寸的变化不影响反射系数, 从而无法对缺陷进行轴向定量。

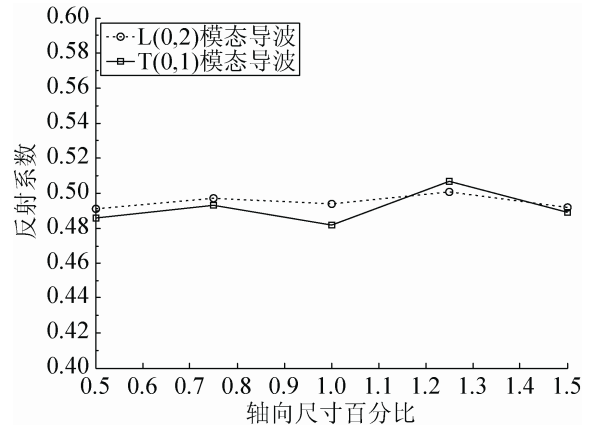
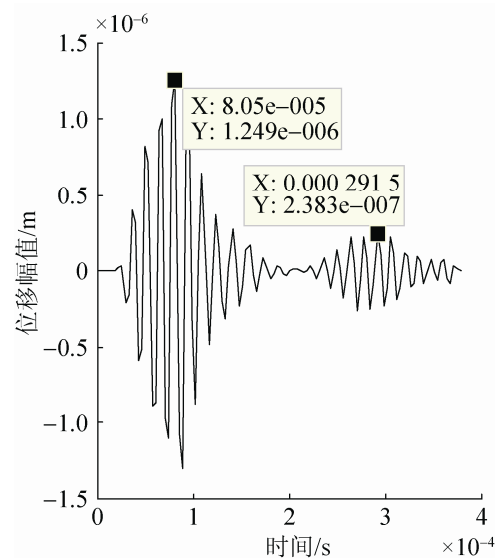


图 4 缺陷轴向尺寸与反射系数的关系

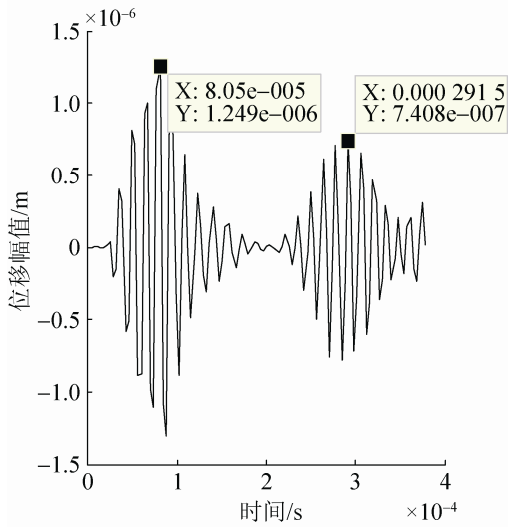
3.2 缺陷的周向定位及尺寸定量仿真分析

图 5(a)和 5(b)表示缺陷轴向尺寸为 100%时, 选取两个不同周向尺寸缺陷, 仿真得到的 L(0,2)模态导波回波信号, 比较图 5(a)和图 5(b)可见, 缺陷周向尺寸由 20%增大到 60%后, 其缺陷波幅值由 0.238 μm 增加到 0.741 μm 。

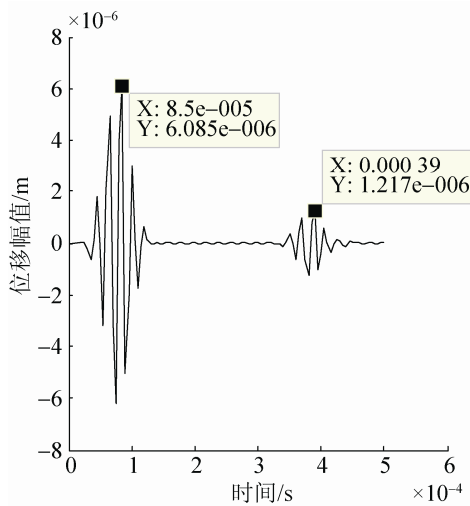
图 5(c)和 5(d)表示缺陷轴向尺寸为 100%时, 选取两个不同周向尺寸缺陷, 仿真得到的 T(0,1)模态导波回波信号。比较图 5(c)和图 5(d), 同样可看到, 当缺陷周向尺寸由 20%增大到 60%后, 其缺陷波幅值由 1.217 μm 增加到 3.571 μm 。



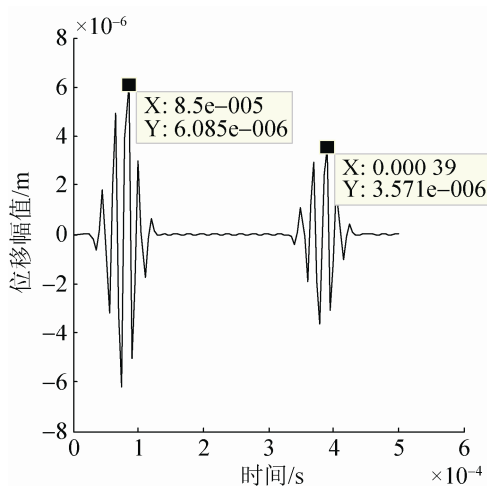
(a) 周向缺陷 20% L(0,2)回波



(b) 周向缺陷 60%L(0,2)回波



(c) 周向缺陷 20% T(0,1)回波



(d) 周向缺陷 60% T(0,1)回波

图5 不同周向缺陷尺寸时 L(0,2)及 T(0,1)模态导波回波信号

采用控制变量法, 同样设定缺陷轴向尺寸为 100%, 缺陷周向尺寸分别为 20%, 40%, 60%, 80%, 通过有限元仿真分析回波信号, 仿真获得 L(0,2) 模态导波和 T(0,1) 模态导波的反射系数变化如图 6 所示, 由图 6 可知, 反射系数与缺陷周向尺寸成正比的线性关系, 根据数值模拟过程可知, 激励信号是等幅加载在管道的端面上, 发射系数与缺陷的周向位置没有关系。因此, 对于通透型缺陷, 采用 L(0,2) 模态导波和 T(0,1) 模态导波检测时, 通过缺陷回波幅值可以对缺陷的周向进行定量。

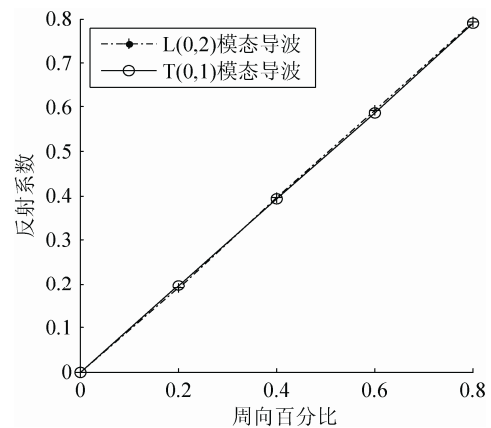


图6 缺陷周向尺寸与反射系数的关系

4 结论

(1) 使用 L(0,2) 和 T(0,1) 两种模态导波对管道检测时, 通过缺陷回波与入射表面波的渡越时间差, 并根据此管道材料中的波速, 可以确定缺陷的轴向位置。

(2) 对于通透型缺陷, 采用 L(0,2) 和 T(0,1) 两种模态导波检测时, 缺陷轴向尺寸的变化与回波信号反射系数无强相关性。

(3) 采用 L(0,2) 和 T(0,1) 两种模态导波对管道中的通透型缺陷进行检测时, 缺陷的周向尺寸与反射系数存在线性关系, 据此可通过缺陷回波幅值确定缺陷的周向大小。

参考文献:

- [1] 周燕, 董怀荣, 周志刚, 等. 油气管道内检测技术的发展 [J]. 石油机械, 2011, 39(3): 74-77.
- [2] 周正干, 冯海伟. 超声导波检测技术的研究进展 [J]. 无损检测, 2006, 28(2): 57-63.

- [3] Fateri S, Boulgouris N V, Wilkinson A, et al. Frequency-sweep examination for wave mode identification in multimodal ultrasonic guided wave signal [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* (S0885-3010), 2014, 61(9): 1515-1524.
- [4] 陈友兴, 郭娟, 吕娟, 等. 基于频散特性的杆中超声波传播仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(2): 292-294, 317. (Chen Youxing, Guo Juan, Lv Juan, et al. Simulation on Ultrasonic Propagation in Finite Rods Based on Frequency Dispersion Characteristic [J]. *Journal of System Simulation* (S1004-731X), 2010, 22(2): 292-294, 317.)
- [5] Lowe P S, Fateri S, Sanderson R, et al. Finite element modeling of the interaction of ultrasonic guided waves with coupled piezoelectric transducers [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* (S1354-2575), 2014, 56(9): 505-509.
- [6] 何存富, 李隆涛, 吴斌, 等. 超声导波在管道中传播的数值模拟 [J]. *北京工业大学学报*, 2004, 30(2): 129-133.
- [7] 王悦民, 沈立华, 申传俊, 等. 管道导波无损检测频率选择与管材特征关系 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(8): 243-248.
- [8] Carandente R, Ma J, Cawley P, et al. The scattering of the fundamental torsional mode from axi-symmetric defects with varying depth profile in pipes [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America* (S0001-4966), 2010, 127(6): 3440-3448.
- [9] 董为荣, 帅健, 许葵. 管道腐蚀缺陷超声导波检测数值模拟研究 [J]. *机械强度*, 2008, 30(6): 988-993.
- [10] Zheng M F, Lu C, Chen G Z, et al. Modeling three-dimensional ultrasonic guided wave propagation and scattering in circular cylindrical structures using finite element approach [J]. *Physics Procedia* (S1875-3892), 2011, 22: 112-118.
- [11] Gerges D. Assessment of ultrasonic guided wave inspection methods for structural health monitoring [D]. Michigan, USA: Michigan State University, 2014.
- [12] Sotja E, Malkaj P, Sotja D H, et al. Generation and analyzes of guided waves in planar structures [J]. *Engineering* (S1947-3931), 2011, 3(5): 532-537.
- [13] 何存富, 吴斌, 王秀彦. 固体中的超声波 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [14] Demma A, Cawley P, Lowe M, et al. The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurement [J]. *NDT& E International* (S0963-8695), 2004, 37(3): 167-180.
- [15] Lowe M J S, Alleyne N D, Cawley P, et al. Defect detection in pipes using guided waves [J]. *Ultrasonics* (S0041-624X), 1998, 36(1): 147-154.

(上接第 2776 页)

- [6] Zhu Yueying, Wang Dafang, Yang Dongyu, et al. Research progress of switched reluctance motor drive system [C]// *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Changchun, China. USA: IEEE, 2009: 784-789.
- [7] 杭俊, 黄友锐. 开关磁阻电机在蓄电池电机车上的应用 [J]. *电力电子技术*, 2010, 44(9): 60-62.
- [8] Cheshmehbeigi H M, Yari S, Afjei E. Design and analysis of Low Torque Ripple Switched Reluctance Motor using 3-Dimensional Finite Element Method [C]// *European Conference on Circuit Theory and Design*, Antalya, 2009: 857-861.
- [9] 王旭东, 王喜莲, 王炎, 等. 开关磁阻电动机电流双幅值斩波控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2000, 20(4): 83-86.
- [10] 潘再平, 罗星宝. 基于迭代学习控制的开关磁阻电机转矩脉动抑制 [J]. *电工技术学报*, 2010, 25(7): 51-55.
- [11] Nicholas J Nagel, Robert D Lorenz. Rotating vector methods for smooth torque control of a switched reluctance motor drive [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications* (S0093-9994), 2000, 36(2): 540-548.
- [12] 丁文, 梁得亮. 一种开关磁阻电机非线性磁链与转矩建模方法 [J]. *电机与控制学报*, 2008, 12(6): 659-665.
- [13] 梁得亮, 丁文, 鱼振民, 等. 基于自适应网络模糊推理系统的开关磁阻电机建模方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(9): 86-92.
- [14] 张树峰, 徐利梅, 张鸿, 等. 小型分布式发电系统中的风光建模与仿真分析 [J]. *系统仿真学报*, 2014, 26(2): 398-405. (Zhang Shufeng, Xu Limei, Zhang Hong, et al. Modeling and Simulation of Wind-Solar Power for Small Scale Distributed Power Generation System [J]. *Journal of System Simulation* (S1004-731X), 2014, 26(2): 398-405.)
- [15] 马永光, 张照彦, 王兴武, 等. 基于 Matlab 的斩波串级调速系统电子保护电路研究 [J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(3): 620-626, 633. (Ma Yongguang, Zhang Zhaoyan, Wang Xingwu, et al. Research on Electronic-protection Circuit of Chopper Cascade Speed System Based on MATLAB [J]. *Journal of System Simulation* (S1004-731X), 2015, 27(3): 620-626, 633.)