

基于扭转模式的管道裂纹聚焦成像

田振华 徐 鸿 杨志磊

华北电力大学, 北京, 102206

摘要:利用超声导波技术,对管道的裂纹检测进行了研究,理论分析了扭转模式的传播特点。基于有限元模拟,分析了不同尺寸裂纹对 $T(0,1)$ 模态传播的影响。为检测管道中裂纹的位置和尺寸,引入了综合聚焦成像算法。利用该算法,将接收到的反射波在管道不同位置 (θ, z) 处聚焦成像,并建立管道的成像分布 $I(\theta, z)$ 。成像结果直观地反映了裂纹的位置和尺寸。

关键词:导波; 扭转模式; 聚焦成像; 裂纹

中图分类号: TB559; O347.4

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.017

Focusing Imaging of Cracks in Pipes Based on Torsional Modes

Tian Zhenhua Xu Hong Yang Zhilei

North China Electric Power University, Beijing, 102206

Abstract: Using ultrasonic guided wave technique, the crack detection of pipe was studied. Theoretically, characteristics of torsional modes were analyzed. Based on finite element simulation, affections of cracks with different lengths on $T(0,1)$ mode were analyzed. In order to quantify the location and size of cracks, a synthetic focusing method was employed. Using this method, the recorded back-scattered wave signals were focused at different locations (θ, z) , and the imaging distribution $I(\theta, z)$ was developed. This imaging result reflects the size and location of crack clearly.

Key words: guided wave; torsional mode; focusing imaging; crack

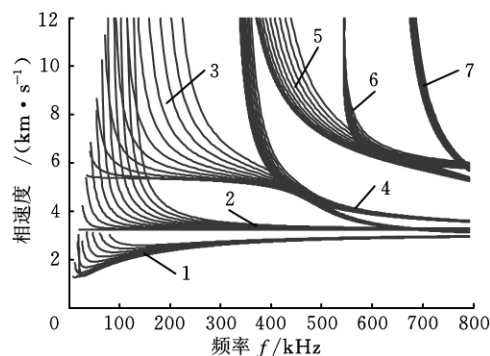
0 引言

管道作为一种输送工具,在火电站及核电站中得到了广泛应用。由于其输送介质一般为高温高压甚至是带有辐射的流体,故一旦发生泄漏事故,将破坏周围环境,影响电站的安全运行,带来巨大的经济损失。加大对电站管道的监测,对安全经济运行有至关重要的作用。在管道损伤检测的众多方法中,超声导波技术具有传播距离远、衰减小且对缺陷敏感的优点。然而,与横波及纵波不同,导波具有频散和多模态的特性,裂纹对导波的影响更为复杂。Alleyne 等^[1]研究了管道中周向裂纹对导波的反射,并建立了裂纹尺寸与反射系数的关系。邓菲等^[2]利用导波时间翻转法,对管道缺陷进行了检测。何存富等^[3]利用导波纵向模态,对管道中周向缺陷进行检测,分析了缺陷尺寸对回波幅值的影响。刘增华等^[4]基于扭转模式对管道缺陷进行检测,并利用反射回波进行缺陷定位。虽然上述方法建立了导波信号与缺陷间的关系,但是不能直观地给出缺陷的位置及尺寸,没有实现管道缺陷的重构成像。

本文在管道导波检测中引入综合聚焦成像算法。该方法是一种信号后处理虚拟聚焦技术,应用于雷达和声纳领域。本文利用综合聚焦方法对管道重构成像,进行裂纹的聚焦成像检测。

1 管道中的导波

管道中的导波是横波和纵波在边界条件下相互作用形成的,它包含三种模态:纵向模态、扭转模态和弯曲模态。根据管道的边界条件,求解波动方程,得到管道的频散曲线,如图 1 所示,其中,内径 $r_1 = 39.5\text{mm}$,外径 $r_2 = 44.5\text{mm}$,弹性模量



1. $L(0,1) - F_L(10,1)$ 2. $T(0,1) - F_T(10,1)$ 3. $L(0,2) - F_L(10,2)$ 4. $T(0,2) - F_T(10,2)$ 5. $L(0,3) - F_L(10,3)$ 6. $L(0,4) - F_L(10,4)$ 7. $T(0,3) - F_T(10,3)$

图 1 管道的相速度频散曲线

$E = 210\text{GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.27$, 密度 $\rho = 7850\text{kg/m}^3$ 。该频散曲线由多族曲线组成,每族曲线包含一条轴对称模态和多条非轴对称模态曲线^[5]。图 2 所示为不同的导波模态的分类。纵向模态 $L(0,m)$ 是轴对称模态,周向阶数为 0(位移与圆周方向无关)。在曲线族中,与每条纵向模态 $L(0,m)$ 曲线对应的弯曲模态为 $F_L(n,m)$ 。扭转模态 $T(0,m)$ 是轴对称模态,仅具有圆周方向

收稿日期:2011-10-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11074073)

的位移。与其对应的弯曲模式为 $F_T(n, m)$ 。弯曲模式 $F_L(n, m)$ 和 $F_T(n, m)$ 是非轴对称模式, 质点在周向、轴向和径向都具有位移变化。

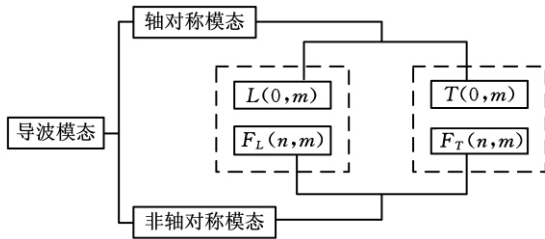
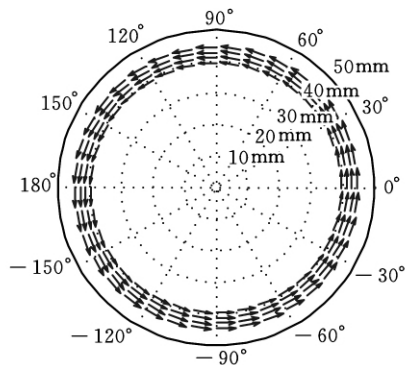
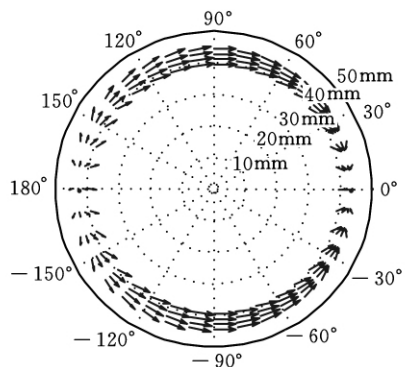


图2 导波模式分类^[5]

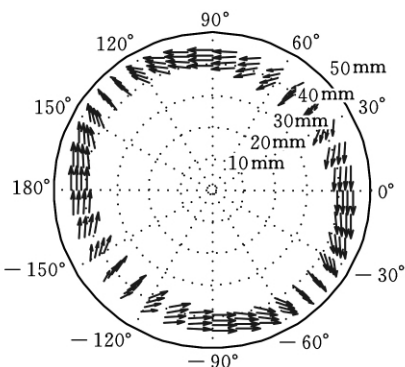
图3所示为频率160kHz时, 扭转模式 $T(0, 1)$ 和弯曲模式 $F_T(1, 1)$ 、 $F_T(2, 1)$ 在管道截面内的位移场分布。扭转模式 $T(0, 1)$ 的径向位移为



(a) 扭转模式 $T(0, 1)$



(b) 弯曲模式 $F_T(1, 1)$



(c) 弯曲模式 $F_T(2, 1)$

图3 管道截面内的位移场分布

零, 周向位移不为零; 位移场分布均匀, 随着周向

角度 θ 的变化, 位移幅值保持不变; 随着径向位移的增大, 幅值略微增大。管道截面内, 弯曲模式 $F_T(1, 1)$ 及 $F_T(2, 1)$ 在径向和周向都具有位移变化, 位移场分布不均匀, 随周向角度 θ 的变化, 位移幅值呈现出周期性。

2 基于扭转模式的缺陷检测

对于缺陷检测而言, 通常选用低频区轴对称模式, 即纵向模式 $L(0, 2)$ 和扭转模式 $T(0, 1)$ 。文献[6-7]选用低频纵向模式 $L(0, 2)$ 检测缺陷, 因为该模式具有以下优点:

(1) 100% 管壁覆盖。因为 $L(0, 2)$ 模式轴对称, 且沿管壁方向的模式结构基本保持不变, 所以该模式可以检测到任何周向位置和径向位置处的缺陷。

(2) 存在低频散区。从整体而言, $L(0, 2)$ 属于频散模式, 但是在低频区, $L(0, 2)$ 模式的频散较低。如图1所示, 频率在 50 ~ 300kHz 的范围内, $L(0, 2)$ 模式的频散曲线接近水平。

(3) 易于激发, 衰减小。在低频区存在的模式数目较少, 易于激发特定的模式; 而且低频区模式的衰减小, 传播距离远。

低频扭转模式 $T(0, 1)$ 属于低频区轴对称模式, 且模式结构沿管壁截面分布均匀。与 $L(0, 2)$ 模式的优点类似, 低频 $T(0, 1)$ 模式同样具有易于激发, 衰减幅度小和 100% 管壁覆盖的优点。另一方面, 与 $L(0, 2)$ 模式相比, $T(0, 1)$ 模式还具有以下优点^[8-9]:

(1) 非频散模式。 $T(0, 1)$ 模式是非频散模式, 传播速度 c_{T0} 不随频率发生变化。 c_{T0} 的表达式如下:

$$c_{T0} = c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1)$$

式中, μ 为剪切模量。

这里, $T(0, 1)$ 模式的速度 c_{T0} 保持不变, 与剪切波速度 c_s 相同。

(2) 能量泄漏低。如图3所示, 在 $T(0, 1)$ 模式中质点的径向位移为零。当管壁表面存在非黏性流体层时, 导波能量向流体层的泄漏较低。

3 裂纹对 $T(0, 1)$ 模式的影响

当管道中存在裂纹时, 裂纹会影响导波的传播, 在裂纹处发生反射、散射和透射, 并伴随着模式转换, 生成高阶模式的导波。基于有限元模拟, 下面将讨论裂纹对 $T(0, 1)$ 模式的影响。

3.1 有限元模型的建立

基于 ANSYS 软件,选取 8 节点 Solid45 单元,建立管道模型(轴向长度 $L=1000\text{mm}$,内径 $r_1=39.5\text{mm}$,外径 $r_2=44.5\text{mm}$)。在管道外壁面轴向 $L_{\text{crack}}=450\text{mm}$,周向 $\theta_{\text{crack}}=\pi/2$ 位置处,具有一条裂纹(轴向尺寸为 Δl ,深度为 Δr ,周向角度为 $\Delta\theta$),如图 4 所示。

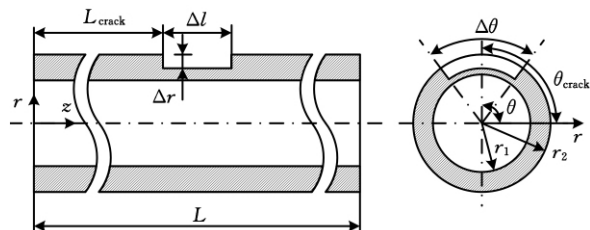


图 4 管道模型概图

为激发低频 $T(0,1)$ 模态,对管道端部($z=0$)外壁面圆周(半径 $r=44.5\text{mm}$)处的节点施加周向剪切力载荷。选用 Hanning 窗调制的 160kHz 、 5 周期的正弦波作为激励载荷,其表达式如下:

$$q(t) = \frac{A}{2} \sin(2\pi f_c t) \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f_c t}{5}\right) \right] \quad (2)$$

式中, A 为激励载荷的幅值; f_c 为中心频率。

弹性波的有限元模拟属于瞬态动力学分析,为保证计算精度,网格尺寸和积分时间步长通常需要满足以下关系式:

$$L_{\max} < \frac{\lambda_{\min}}{n_{\min}} = \frac{c_{\min}}{n_{\min} f_c} \quad (3)$$

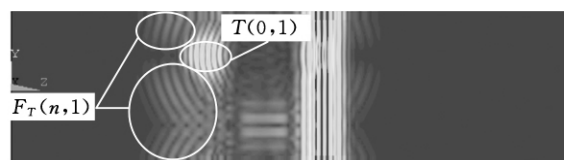
$$\Delta t \leq \frac{L_{\min}}{c_1} \quad (4)$$

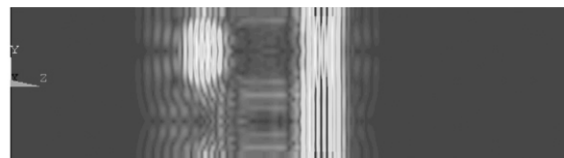
式中, $L_{\max}$ 和 $L_{\min}$ 分别为单个网格上两节点间的最大距离和最小距离; $\lambda_{\min}$ 为最小波长; $n_{\min}$ 为每个波长内的最少网格数(为保证收敛, $n_{\min}$ 取值为 $8 \sim 10$); c_1 为纵波波速; $c_{\min}$ 为弹性波的最小群速度。

3.2 模拟结果分析

根据上述方法,建立有限元模型,对管道中的轴对称模态 $T(0,1)$ 的传播进行了模拟。利用 ANSYS 瞬态动力学分析方法,可以得出不同时刻管道的波场分布,记为 U 。管道中的全局波场 U_{all} 包含了 $T(0,1)$ 模态的入射波场 U_{T01} ,以及裂纹引起的波场变化 U_{crack} 。当 $t=18.5\mu\text{s}$ 时,分别提取不同裂纹长度下有限元模型的波场幅值,如图 5 所示(该图是柱坐标系下的位移云图,管道壁面沿 $\theta=\pi$ 展开)。

入射波 U_{T01} 是 $T(0,1)$ 模态,沿周向 θ 均匀分布;当入射波遇到裂纹时,部分能量被反射,在裂纹的前侧形成反射波 U_{reflect} ;经过裂纹继续传播的部分,幅值降低形成衰减区,如图 5 所示。在发生反射的同时,伴随着模态转换,入射模态 $T(0,1)$ 在裂纹处发生模态转换,生成对应的高阶


 (a) $\Delta l=4\text{mm}$, $\Delta r=2.5\text{mm}$, $\Delta\theta=\pi/4$

 (b) $\Delta l=4\text{mm}$, $\Delta r=5\text{mm}$, $\Delta\theta=\pi/4$

 (c) $\Delta l=4\text{mm}$, $\Delta r=2.5\text{mm}$, $\Delta\theta=3\pi/4$

 (d) $\Delta l=4\text{mm}$, $\Delta r=2.5\text{mm}$, $\Delta\theta=\pi/4$

图 5 管道模型概图

模态 $F_T(n,1)$ 。如图 5a 所示,沿 $\theta=0$ 方向传播的是 $T(0,1)$ 模态;沿 $\theta \neq 0$ 方向传播的是弯曲模态 $F_T(n,1)$ 。

对比图 5a 与图 5b,当裂纹深度 Δr 增大时,反射波幅值增强,衰减区幅值减弱。对比图 5a 与图 5c,当周向角度 $\Delta\theta$ 增大时,反射波幅值增强,衰减区幅值减弱;并且范围沿周向扩展。对比图 5a 与图 5d,当轴向尺寸 Δl 增大时,反射波沿轴向扩展,形成两组反射波。如图 5d 所示,在反射范围存在两组 $T(0,1)$ 模态。

4 聚焦成像

上文模拟了管道中 $T(0,1)$ 模态的传播,分析了不同尺寸裂纹对导波传播的影响。为检测裂纹的位置及尺寸,下面引入综合聚焦成像算法,并利用有限元模拟数据验证该方法的可行性。

4.1 聚焦成像算法

下面将有限元模拟结果作为传感器的接收信号进行分析。选取管道端部($z=0$)外壁面半径 $r=44.5\text{mm}$ 的圆周上等间距分布的 32 个节点作为接收端,并提取其周向位移值。根据接收信号建立端部接收阵列的信号函数,记为 $u(\theta, t, z=0)$;该函数以时间 t 和接收端周向角度 θ 为自变量。如图 6 所示,最左侧 $t=0$ 附近的波列是入射波 u_{T01} ,信

号幅值较高; $t=29\mu\text{s}$ 附近是裂纹反射波 u_{reflect} ; $t=57\mu\text{s}$ 附近是裂纹的二次反射波 $u_{\text{reflect}-2}$; $t=62\mu\text{s}$ 附近是管道的端部反射波 u_{end} 。因为裂纹中心在 $\theta=\pi/2$ 处,所以裂纹反射波 u_{reflect} 在 $\theta=\pi/2$ 位置处,幅值相对较高。相比而言,端部反射波 u_{end} 在 $\theta=\pi/2$ 位置处,幅值相对较低,形成衰减区。

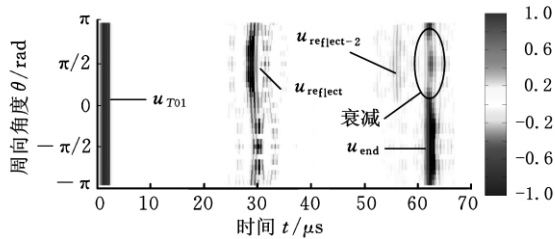


图6 端部接收阵列的信号函数 $u(\theta, t, z=0)$
($\Delta l=4\text{mm}, \Delta r=5\text{mm}, \Delta\theta=\pi/4$)

对信号函数 $u(\theta, t, z=0)$ 进行二维傅里叶变换:

$$F(n, \omega, z=0) = 2DFT_{\theta, t}[u(\theta, t, z=0)] \quad (5)$$

模态函数 $F(n, \omega, z=0)$ 以周向阶数 n 及角频率 ω 为自变量。当角频率 ω 不变时, $F(n, z=0)$ 与扭转弯曲模态族对应(即 $T(0,1), F_T(1,1), F_T(2,1), \dots, F_T(n,1)$), 代表不同周向阶数导波的分解量。

导波沿管道传播,在裂纹处发生反射,不同模态的反射波传播回接收端。各个模态的相位随传播距离不断变化。为重构不同位置处的模态函数,对 $F(n, \omega, z=0)$ 采取相位翻转。在不同的轴向位置 $z=\zeta$ 处,模态函数为

$$F(n, \omega, z=\zeta) = F(n, \omega, z=0) \cdot \exp(-jk_0\zeta) \exp(-jk_n\zeta) \quad (6)$$

式中, $\exp(-jk_0\zeta)$ 表示入射波 $T(0,1)$ 模态的相位翻转; $\exp(-jk_n\zeta)$ 表示不同模态反射波的相位翻转; k_n 为扭转弯曲模态族的波数。

对模态函数 $F(n, \omega, z=0)$ 进行傅里叶逆变换,建立管道的成像分布:

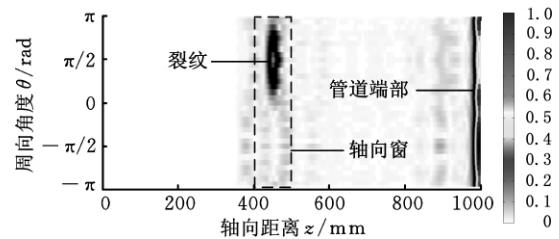
$$I(\theta, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\omega \in \Omega} F(n, \omega, z) \exp(j\omega t) \exp(jn\theta) d\omega dn \quad (7)$$

4.2 成像结果

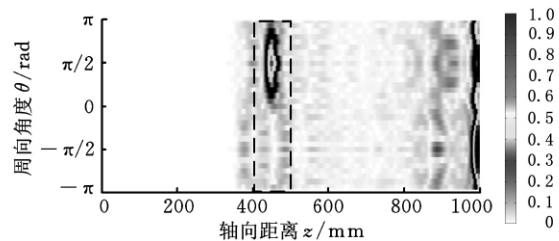
利用有限元模拟值,结合上述聚焦成像方法,重构管道的成像分布 $I(\theta, z)$ 。如图7a所示, $\theta=\pi/2, z=450\text{mm}$ 处的图像代表裂纹; $z=1000\text{mm}$ 处的图像代表管道端部。因为裂纹的二次反射,在 $z=900\text{mm}$ 处出现裂纹的虚假成像,如图7c所示。

对比图7a与图7b,当裂纹深度 Δr 增加时,裂纹处成像的幅值增强。对比图7a与图7c,当周向角度 $\Delta\theta$ 增大时,裂纹成像的幅值增大,并且沿 θ

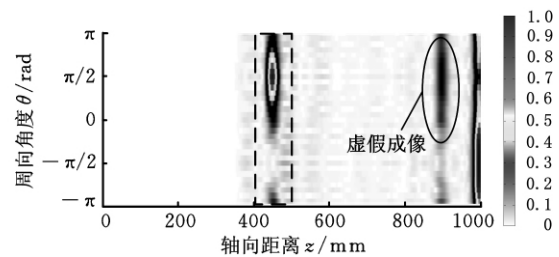
方向扩展。对比图7a与图7d,当轴向尺寸 Δl 增加时,裂纹成像沿 z 向扩展。



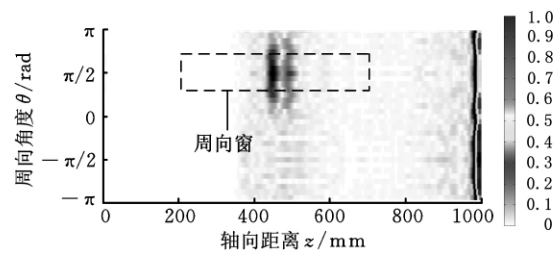
(a) $\Delta l=4\text{mm}, \Delta r=2.5\text{mm}, \Delta\theta=\pi/4$



(b) $\Delta l=4\text{mm}, \Delta r=5\text{mm}, \Delta\theta=\pi/4$



(c) $\Delta l=4\text{mm}, \Delta r=2.5\text{mm}, \Delta\theta=3\pi/4$



(d) $\Delta l=4\text{mm}, \Delta r=2.5\text{mm}, \Delta\theta=\pi/4$

图7 管道成像分布 $I(\theta, z)$

为了建立裂纹尺寸与成像结果间的关系,在裂纹附近对成像分布 $I(\theta, z)$ 取平均:

$$P = \frac{1}{2\pi(z_2 - z_1)} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{z_1}^{z_2} I(\theta, z) dz d\theta \quad (8)$$

如图8所示,裂纹深度 Δr 保持不变,随着裂纹周向角度 $\Delta\theta$ 增大,平均值 P 逐渐增大,近似成线性关系。

选用周向窗,对 $I(\theta, z)$ 沿 θ 方向取平均:

$$P(z) = \frac{1}{\theta_2 - \theta_1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} I(\theta, z) d\theta \quad (9)$$

对图7d所示的成像结果,在周向窗内沿 θ 方向取平均。如图9所示, $P(z)$ 在 448mm 与 491mm 处取得极大值,两极值间的轴向距离记为 Δz 。如图10所示,当裂纹沿轴向扩展时, Δz 逐渐增大。当实际裂纹尺寸 $\Delta l > \lambda$ 时(频率 160kHz ,

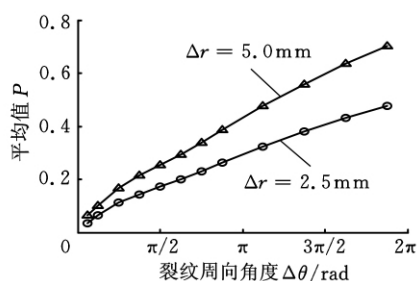


图 8 $I(\theta, z)$ 在轴向窗内的平均值 P 与裂纹深度 Δr 及周向角度 $\Delta\theta$ 的关系

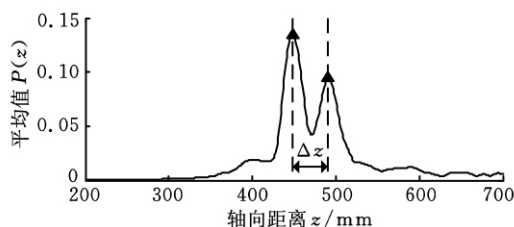


图 9 $I(\theta, z)$ 在周向窗内沿 θ 方向的平均值 $P(z)$

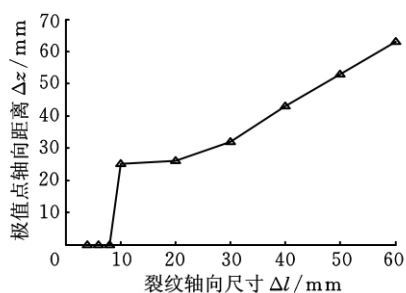


图 10 轴向距离 Δz 与裂纹实际尺寸 Δl 的关系

$T(0, 1)$ 模式的波长 $\lambda = 20\text{mm}$), 极值点间的轴向距离 Δz 与 Δl 接近。当裂纹的轴向尺寸 $\Delta l < \lambda/2$ 时, 仅存在一个极值点, 轴向距离 $\Delta z = 0$ 。

5 结束语

本文分析了扭转模式导波的波场结构和传播特点。当扭转模式 $T(0, 1)$ 经过裂纹时, 在裂纹处导波发生了透射、反射, 并伴随有模式转换。透射部分, 幅值降低形成衰减区; 反射部分, 在裂纹的裂纹前侧形成反射区。在裂纹处, 导波发生模式转换, 生成高阶模式 $F_T(n, 1)$ 。

基于综合聚焦成像算法, 重构了管道的成像分布 $I(\theta, z)$, 该分布表示在 (θ, z) 位置处存在裂纹的可能性。聚焦成像结果与管道实际情况一致, 直观地反映了裂纹的尺寸和位置。当裂纹尺寸沿径向、周向及轴向的变化时, 成像分布 $I(\theta, z)$ 发生变化。当裂纹深度 Δr 或周向角度 $\Delta\theta$ 增加时, 成像强度的平均值 P 增加; 且 P 与 $\Delta\theta$ 近似成线性关系。

本文基于有限元模拟值对聚焦成像算法进行了初步验证, 结果表明利用该方法检测管道中裂纹缺陷是可行的。

参考文献:

- [1] Alleyne D N, Lowe M J S, Cawley P. The Reflection of Guided Waves from Circumferential Notches in Pipes[J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, 65: 635-641.
- [2] 邓菲, 吴斌, 何存富. 基于时间翻转的管道导波缺陷参数辨识方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 18-24.
- [3] 何存富, 刘增华, 孙雅欣, 等. 基于超声导波技术对弯管中缺陷检测的实验研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(18): 1662-1665.
- [4] 刘增华, 吴斌, 王秀彦, 等. 扭转模式在带黏弹性包覆层管道中缺陷检测的实验研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(5): 564-567.
- [5] Sun Z, Zhang L, Rose J L. Flexural Torsional Guided Wave Mechanics and Focusing in Pipe[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127: 471-478.
- [6] Alleyne D N, Cawley P. Long Range Propagation of Lamb Waves in Chemical Plant Pipework[J]. Material Evaluation, 1997, 55: 504-508.
- [7] Cawley P, Lowe M J S, Simonetti F, et al. The Variation of the Reflection Coefficient of Extensional Guided Waves in Pipes from Defects as a Function of Defect Depth, Axial Extent, Circumferential Extent and Frequency[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2002, 216: 1131-1143.
- [8] Alleyne D N, Pavlakovic B, Cawley P. Rapid Long Range Inspection of Chemical Plant Pipework Using Guided Waves[J]. Insight, 2001, 43: 93-96.
- [9] Demma A, Cawley P, Lowe M, et al. The Reflection of Fundamental Torsional Mode from Cracks and Notches in Pipes[J]. Journal of Acoustical Society of America, 2003, 114: 611-625. (编辑 郭伟)

作者简介: 田振华, 男, 1987 年生。华北电力大学能源动力与机械工程学院博士研究生。研究方向为结构健康监测。徐 鸿, 男, 1959 年生。华北电力大学能源动力与机械工程学院教授、博士研究生导师。杨志磊, 男, 1986 年生。华北电力大学能源动力与机械工程学院硕士研究生。