

基于空间拓展法的管道高阶螺旋导波 波包追踪方法研究

周进节¹, 郑 阳², 张宗健², 谭继东²

(1. 中北大学机械工程学院, 山西太原 030051; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029)

摘要: 螺旋导波是管道短距离高精度层析成像技术采用的主要导波模式, 可以有效地提高成像分辨率, 弥补目前管道导波长距离大范围检测精度低的缺点, 在管道腐蚀检测中具有重要意义。然而由于导波的频散及螺旋导波的多路径传播特性, 换能器接收到的检测信号波包众多, 且经常发生重叠。为了便于分析这些波包的来源, 需要有效的方法来计算出各阶螺旋传播路径的长度及波包到达时间, 进行波包追踪。推导了基于空间拓展法的管道高阶螺旋导波传播路径的计算模型, 并针对各向均匀辐射的柱面波前兰姆波形成的管道螺旋导波, 进行了数值计算和实验验证, 证明了模型的正确性及其在波包追踪中的有效性。对利用管道螺旋导波进行检测及层析成像具有理论指导作用。

关键词: 超声导波; 螺旋导波; 波包追踪; 电磁超声换能器; 兰姆波; 无损检测

中图分类号: O429

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-05-0435-07

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.05.006

Pipe helical guided wave packet tracking with space duplication method

ZHOU Jin-jie¹, ZHENG Yang², ZHANG Zong-jian², TAN Ji-dong²

(1. School of Mechanical, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: Helical guided wave is the main guided wave mode used in short distance and high precision tomography technique of the pipeline. It can effectively improve the imaging resolution and make up for the shortcoming of the low inspection accuracy in long-range pipeline guided wave testing. This is of great significance in pipeline corrosion inspection and evaluation. However, due to the dispersion of guided wave and the multipath propagation of helical guided wave, the transducer usually receives a large number of wave packets and they often overlap each other. In order to analyze the source of these wave packets, an effective method is needed to calculate the length of each helical path and the arrival time of each wave packet, and to track the wave packet. In this paper, a calculation model of high-order helical guided wave propagation path based on spatial duplication method is proposed. The helical guided waves formed by circular wavefront Lamb waves with uniform radiation in every direction are studied. The numerical calculation and experimental verification are carried out. The correctness of the model and its effectiveness in wave packet tracking are proved. This paper is useful for pipeline tomography of helical guided waves.

Key words: ultrasonic guided wave; helical guided wave; wave package tracing; electromagnetic acoustic transducer; Lamb wave; non-destructive testing

0 引 言

早期关于管道中传播的超声导波的研究中, 一些文献曾探讨了管道中兰姆波的激发与传播问题^[1-2], 然而在一段时间内, 因超声导波的检测特点, 人们更关注于管道长距离大范围的检测, 管道导波

模式如扭转模式、纵向模式和弯曲模式的研究与应用, 成为管道超声导波研究的主体^[3-5]。近年来, 为了解决超声导波长距离大范围检测中缺陷检测精度不高的问题, 学者们开始研究可实现短距离高精度检测的超声导波层析成像技术。这种方法可以对 2~3 m 范围内管段的壁厚分布进行精确的重构, 从而对片状腐蚀区的形貌和厚度进行精确检测, 具有广阔的工程应用前景^[6]。管道短距离层析成像中, 主要利用兰姆波在管道中形成的螺旋传播模式导波^[7-9], 它是层析成像研究的关键问题之一, 重新受到了研究人员的重视。

长距离检测中常用的扭转和纵向管道导波模

收稿日期: 2018-03-14; 修回日期: 2018-05-28

基金项目: NQI 重点专项(2016YFF0203003)、质检公益性行业科研专项(201410026)、国家自然科学基金(61601413)资助。

作者简介: 周进节(1981—), 男, 湖北天门人, 博士, 研究方向为无损检测与评估。

通讯作者: 郑阳, E-mail: zhengyangchina@126.com

态,波前与管道截面平行,单一模态激发时,沿管道周向排布的接收换能器阵列接收到的直达波包同时到达。与此不同的是,管道螺旋传播模态由于存在无数阶的螺旋传播路径,即使采用单一模态激发,接收换能器阵列上也能接收到无数的波包,且到达的时间不一致,使得确定传播路径及其上的损伤较为困难。因此需要确定各阶螺旋传播模态导波的传播路径及波包到达的时间,才能确定检测信号中波包的来源和特征。换言之,螺旋导波的检测信号需进行波包追踪,识别出其是哪一阶传播路径形成的,才能进一步进行信号分析或成像。

在管道螺旋导波传播路径的计算研究中,文献[7-9]在研究基于高阶螺旋导波的层析成像方法时,均提出了将管道展开成平面,并在左右复制无穷多个管道展开平面空间进行高阶螺旋导波传播路径分析的思想。这种思想将圆柱面上传播的兰姆波这样一个三维空间问题简化为了二维平面问题,对理解螺旋导波传播及解析求解其传播路径具有巨大的帮助。本文在此思想的基础上,进一步提出了空间拓展法计算螺旋传播导波的模型和方法,并针对柱面波前辐射源形成螺旋导波进行了数值计算和实验验证。文章阐述了管道螺旋导波的形成及传播特征,建立了基于空间拓展法计算螺旋传播导波的物理模型,得到了解析表达式,对柱面波前兰姆波形成的螺旋导波的波动方程进行求解并得到了频散曲线,从而完整建立起了计算高阶螺旋传播模态导波波包到达时间的方法。在此基础上,组建了管道阵列电磁超声导波检测实验系统,实验验证了空间拓展法计算模型及表达公式的正确性。

1 管道螺旋导波传播路径计算模型

1.1 管道螺旋导波

当管道厚度小于半径的5%~10%时,可在其上产生类似平板中的兰姆波。激发换能器往往产生带有一定扩散角的波束,因此兰姆波在管道中从激励源出发,以无数角度扩散传播。以各向均匀辐射声源为例,它将产生在管道上以柱面波前扩散传播的声场,在一定的距离范围内形成管道螺旋传播导波。

为了便于分析并形象化地表示螺旋导波的形成过程,将管道从某一处沿轴线方向切开,展成平面进行研究。如图1所示,将周长为 L 、长为 D 的管道,沿某一轴向展开线展成平面后,定义轴向为 y 轴方向,圆周方向为 x 轴方向,坐标原点位于展开面的中心。

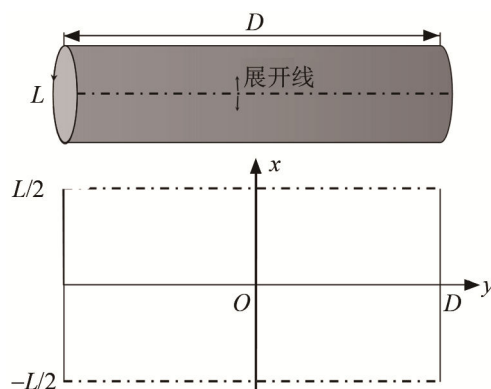


图1 管道沿展开线展开成平面

Fig.1 Expanding the pipe surface into a plane along the unfolding line

考虑某实际钢管(管径为219 mm,管长为4 m,壁厚为6 mm),位于原点的各向均匀辐射波源,在管道上产生波速为 $5\,243\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的柱面波前 S_0 模态兰姆波。此兰姆波将在管道曲面上传播,在管道的展开面上呈现为柱面波前,图2中展示了高阶螺旋导波的形成过程,图中横坐标为管道长度,纵坐标为

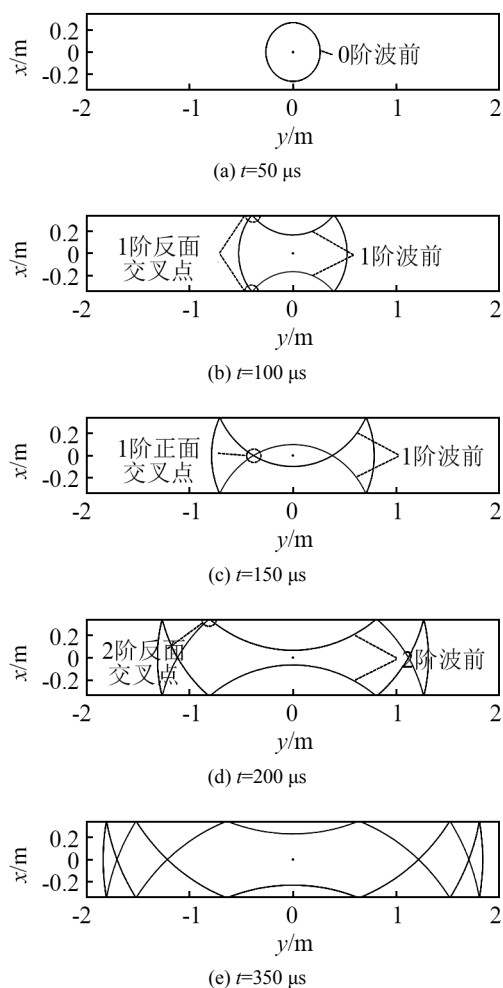


图2 环形辐射波源在管道中形成的螺旋导波波前

Fig.2 Wavefront of helical guided wave generated from a ring radiation source in pipeline

管道展开后截面长度, 单位均为 m。传播 50 μs 后波前如图 2(a)中第一幅波前图所示的呈圆环状, 此时波前未发生自交叉, 称之为 0 阶波前; 随着波的进一步传播, 柱面波前的上、下两部分传播至展开线, 并首次发生自交叉, 展开线与波源所在点在管道上处于正对位置, 从管道上看, 如果把波源所在轴线看作正面, 展开线所处位置即为反面, 因此称首次交叉点为 1 阶反面交叉点, 如图 2(b)中 100 μs 时的波前图中所示; 波前在反面交叉后, 进一步扩散, 会在正面再次交叉, 形成 1 阶正面交叉点, 如图 2(c)所示; 在 1 阶反面交叉点和 2 阶反面交叉点之间形成的圆弧波前为 1 阶波前, 以次类推, 形成了高阶波前。管道螺旋传播导波本质上是由于管道的对称封闭结构, 使得同一个波前在管道上传播并反复交叉形成的。

值得指出的是, 前面以各向均匀辐射波源形成螺旋导波为例进行阐述, 但各向均匀辐射波源并不是管道中产生螺旋导波的必要条件, 对于非均匀波源(如有一定波束指向性的波源), 只要波动场能覆盖整个管道表面, 亦可形成螺旋导波。

1.2 空间拓展法计算螺旋导波路径

为了计算螺旋导波路径, 采用一种空间拓展的物理模型来考虑管段上形成的多个波前及其反复交叉的现象。如图 1 中所示, 管段沿任一轴线切开铺平, 则可形成一个二维的矩形平面, 展开后矩形的宽度 L 为圆管的周长, 矩形的长度 D 为管段的长度, 假设展开后的管段平面为 Ω_0 。管面展开后, 展开线形成的上下边界在管道上为同一条线, 如果波前边界到达 $x=-L/2$ 的展开线后, 继续扩展将从 $x=L/2$ 展开线再次进入空间 Ω_0 。同理, 如果波前边界到达 $x=L/2$ 的展开线后, 继续扩展将从 $x=-L/2$ 展开线再次进入空间 Ω_0 。利用这种特点, 可以想象在管段平面 Ω_0 左右对称地复制一系列 $\Omega_{-m}, \dots, \Omega_{-1}, \Omega_1, \dots, \Omega_m$ 作为对管段空间 Ω_0 的扩展空间, 每一个扩展空间都是原空间的复制, 如图 3 中所示。这样使得展开线连接在一起, 用周期性分布的平面空间表达了封闭结构的管道面。

设管段端部的某一发射换能器 $T_i(x_i, y_i)$ 产生柱面波前兰姆波, 传播一定距离后, 被接收换能器 $R_j(x_j, y_j)$ 接收。在各向同性介质中, 柱面波前的兰姆波使得从发射点到接收点的传播路径为直线。如图 3 所示, 从 T_i 到 R_j 沿管道表面直接传播的路径为 P_0 路径, 沿管道表面右旋绕管 1 周的传播路径为 P_1 , 右旋绕管 M 周的传播路径为 P_M 。同理, 沿管道表面左旋绕管 1 周的传播路径为 P_{-1} , 左旋绕管 M

周的传播路径为 P_{-M} 。

在各向同性介质中, 从换能器 (x_0, y_0) 处发射柱面波前的兰姆波, 即波前为以发射点为圆心的圆周, 平面中从发射点到接收点波的传播路径为直线。如图 3 中所示, 直接传播至检测点 (x, y) 的路径为 P_0 , 向右传播的波前, 绕管 1 周后传播至检测点的路径为 P_1 , 以此类推, 绕管 r 周后传播至检测点的路径为 P_r 。向左传播的波前, 绕管 1 周后传播至检测点的路径为 P_{-1} , 以此类推, 绕管 r 周后传播至检测点的路径为 P_{-r} 。以绕管的周次 r 定义螺旋导波的阶数, 即螺旋波绕管道的圈数。符号“+”号表示右旋前进波, “-”号表示左旋前进波, 则 P_r 为 r 阶右旋螺旋导波路径, P_{-r} 为 r 阶左旋螺旋导波路径。

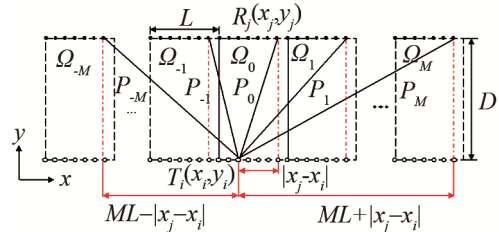


图3 空间展开法计算高阶螺旋传播路径模型
Fig.3 Calculation model of space duplication method for the propagation path of high-order helical guided wave

计算 r 阶螺旋传播导波的路径长度, 其中 $r=0, 1, 2, 3, \dots$, 则:

r 阶(右旋)螺旋波的传播路径长度表达为

$$P_r = \sqrt{(rL + |x_j - x_i|)^2 + D^2} \quad (1)$$

$-r$ 阶(左旋)螺旋波的传播路径长度表达为

$$P_{-r} = \sqrt{(-rL + |x_j - x_i|)^2 + D^2} \quad (2)$$

由于式(1)、(2)中的 r 为自然数, 为了方便表示其区别, 令 $r=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, 同样地 r 为正数时代表 r 阶右旋前进波; r 为负数时, 代表 r 阶左旋前进波。则式(1)、(2)可合并表示为

$$P_r = \sqrt{(rL + |x_j - x_i|)^2 + D^2} \quad (3)$$

其中, $r=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M$ 。式(3)解析表达了从任意发射换能器到任意接收换能器的各阶管道螺旋导波的传播路径长度。

1.3 柱面波前兰姆波的频散曲线

在采用空间拓展法获得了各阶螺旋导波的传播路径及长度后, 还需要知道管道表面柱面波前兰姆波的传播速度, 才能计算出接收换能器收到的各阶螺旋导波波包的到达时间, 从而实现波包的追踪。下面简述柱面波前兰姆波的波速计算模型及过程, 即求解柱面波前兰姆波的波动方程, 得到频散方程, 并计算频散曲线。由圆柱坐标下的 Navier 位移运动控制方程:

$$\begin{cases} (\lambda+2\mu)\frac{\partial\phi}{\partial r}-\frac{2\mu}{r}\frac{\partial\omega_z}{\partial\theta}+2\mu\frac{\partial\omega_\theta}{\partial z}=\rho\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} \\ (\lambda+2\mu)\frac{1}{r}\frac{\partial\phi}{\partial\theta}-2\mu\frac{\partial\omega_r}{\partial z}+2\mu\frac{\partial\omega_z}{\partial r}=\rho\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial t^2} \\ (\lambda+2\mu)\frac{\partial\phi}{\partial z}-\frac{2\mu}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\omega_\theta)+\frac{2\mu}{r}\frac{\partial\omega_r}{\partial\theta}=\rho\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中, λ , μ 为 Lamé 常数; ϕ 为柱坐标下的体积不变量; ω_r 、 ω_θ 和 ω_z 代表旋转矢量的三个分量。 u_r 、 u_θ 和 u_z 分别为柱坐标下三个位移分量。表达式为

$$\begin{cases} \phi=\frac{1}{r}\frac{\partial(ru_r)}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial u_\theta}{\partial\theta}+\frac{\partial u_z}{\partial z} \\ 2\omega_r=\frac{1}{r}\frac{\partial u_z}{\partial\theta}-\frac{\partial u_\theta}{\partial z} \\ 2\omega_\theta=\frac{\partial u_r}{\partial z}-\frac{\partial u_z}{\partial r} \\ 2\omega_z=\frac{1}{r}\left[\frac{\partial(ru_\theta)}{\partial r}-\frac{\partial u_r}{\partial\theta}\right] \end{cases} \quad (5)$$

采用谐波位移场假设和自由边界条件, 求解上述波动方程^[10], 可得到的频散方程如下:

(1) 对称模式频散方程为

$$\frac{\tan(qd)}{\tan(pd)}=-\frac{4k^2pq}{(q^2-k^2)^2} \quad (6)$$

(2) 反对称模式的频散控制方程为

$$\frac{\tan(qd)}{\tan(pd)}=-\frac{(q^2-k^2)^2}{4k^2pq} \quad (7)$$

其中,

$$\begin{cases} p^2=\frac{\rho}{\mu}\omega^2-k^2=\frac{\omega^2}{c_L^2}-k^2 \\ q^2=\frac{\rho}{\lambda+2\mu}\omega^2-k^2=\frac{\omega^2}{c_T^2}-k^2 \end{cases} \quad (8)$$

其中, d 为 1/2 板厚, ρ 为密度, ω 为角频率, c_L 为纵波波速, c_T 为横波波速。求解式(6)~(8)所示的频散方程, 即可得到柱面波前兰姆波的频散曲线。图 4 为计算的钢管上的柱面波前兰姆波频散曲线图, 钢材密度取 $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 杨氏模量为 $2.13\times 10^5\text{ MPa}$, 泊松比为 0.282。

1.4 高阶螺旋传播导波波包追踪

针对某一特定的检测, 若管道规格、材质已知, 检测频率已知, 发射、接收换能器的位置已知, 则利用 1.2 节所述的方法可求出螺旋导波路径, 利用 1.3 节所述方法可得到各模式导波的波包群速度, 从而可以获得各阶螺旋导波的到达时间, 实现接收换能器中各阶螺旋导波波包的追踪。

以某实际钢管(管径为 219 mm, 管长为 4 m, 壁厚为 6 mm)为例, 如图 5 所示, 在其左端面某点设置发射源, 激发柱面波前单一 S_0 模态兰姆波, 计算

间距 0.5、1、2、3、4 m 处沿管道周向等间距分布的 12 个换能器接收到的前 4 阶螺旋导波的波包到达时间。其中, 发射源与接收换能器在同一轴线上。假设激发频率为 170 kHz, 则频厚积为 $1\,020\text{ kHz}\cdot\text{mm}$, 从图 4 钢管上柱面波前兰姆波群速度频散曲线中可得 S_0 模态兰姆波波包的群速度为 $5\,243\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

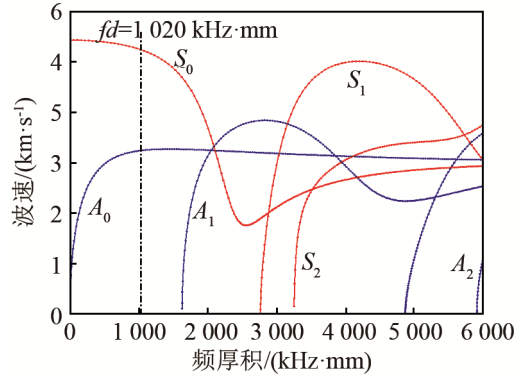


图 4 钢管上柱面波前兰姆波群速度频散曲线

Fig.4 Dispersion curve of circular wavefront Lamb wave in pipeline

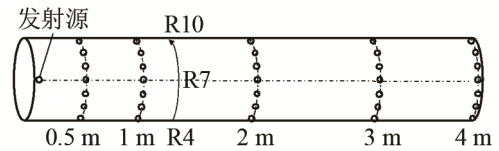


图 5 管道螺旋导波激励、接收模型设置示意图

Fig.5 Schematic diagram of the exciting and receiving model of pipe helical guided wave

利用式(3)求解不同位置处换能器阵列中各阵元接收到的 0~4 阶波包的到达时间, 计算结果如图 6~7 中所示。图 6、7 中横坐标为时间轴, 纵坐标为从 1 到 12 的阵元编号, 图中“+”所示点为波包到达时间点, 为了表示边界的连续性, 在阵元 12 后复制了阵元 1 的波包到达时间点序列。将各阵元的波包到达时间按阶数相连, 可得到图中的连线, 其中零阶波包到达时间点的连线为弧线, 其它阶波包到达时间点的连线近似为直线, 且同阶的左旋和右旋的螺旋路径产生的波包到达时间连线相互交

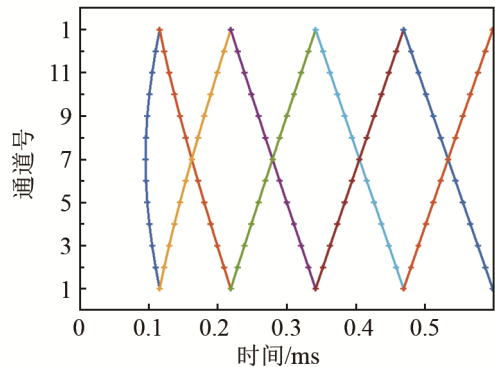


图 6 0.5m 处的换能器阵列接收到的 0~4 阶螺旋导波波包到达时间
Fig.6 Wave packet arriving time of the 0~4 order helical mode Lamb waves received by the transducer array located at 0.5 m

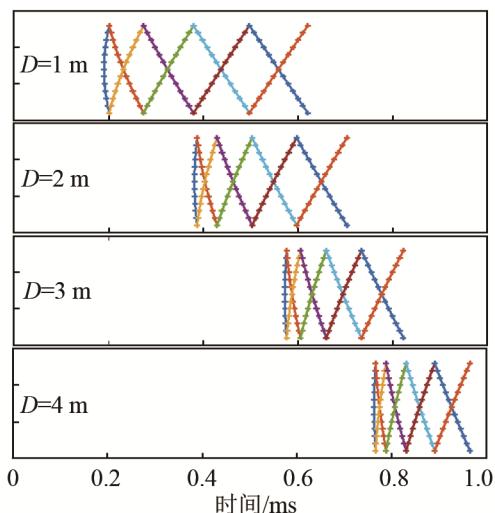


图7 位于1、2、3、4 m的换能器阵列接收到的0~4阶螺旋导波波包到达时间图

Fig.7 Wave packet arriving times of the 0~4 order helical mode Lamb waves received by the transducer array located at 1 m, 2 m, 3 m and 4 m respectively

叉, 交点位于阵元 7(与波源在同一轴线)和阵元 1 处(与波源所在轴线正对)。

2 实验研究

为了验证本文提出的基于空间拓展法的高阶螺旋导波波包追踪方法及其计算模型, 组建系统进行实验验证。实验系统为自行研制的阵列电磁超声导波检测系统 LEMUG-MC24, 如图 8 所示。该系统有 1 个电磁超声导波激励通道和 24 个并行接收通道, 工作频率范围为 30 kHz~1.5 MHz, 具有任意波形线性放大发射功能, 能实现窄频调制信号如汉宁窗调制的正弦波信号的发射, 从而有效地激发电磁超声换能器产生单一模态的超声导波。并行接收通道可实现最多 24 个换能器同时接收导波信号。换能器阵列由两个环形阵列组成, 每个阵列中有 12 个阵元, 在环向等间距分布, 各阵元为环形线圈电磁超声换能器, 类似于文献[11]中研究的换能器, 在特定频率下, 具有较好的单一兰姆波模式激发特性。值得指出的是, 本文中采用 12 个阵元换能器并沿管道周向等间距均匀分布, 主要是为了观察螺旋导波的对称性。在实际使用中, 换能器的个数及间距可以是任意的, 一般依据具体的应用选择适当的数量及排布方式。只要已知激发换能器与接收换能器的位置, 均能利用空间拓展法计算各阶螺旋导波的传播路径, 并进行高阶螺旋导波波包追踪。

为了便于与 1.4 节中的数值计算结果进行对比验证, 实验中, 选用管径为 219 mm、管长为 4 m、壁厚为 6 mm 的钢管作为检测对象。将一个换能器

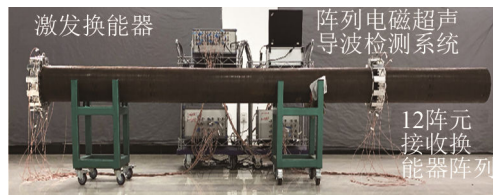


图8 阵列电磁超声导波检测实验系统实物图

Fig.8 The guided wave inspection instrument using electromagnetic acoustic transducer array

阵列环置于管道左端, 任意选其中的一个阵元作为激发阵元, 另一个换能器阵列环分别放置于距激励阵元 0.5、1、2、3、4 m 处, 采集不同距离上接收到的各阶螺旋导波检测信号。上述实验设置严格地与 1.4 节中的数值计算案例保持一致。

实验中采用中心频率为 170 kHz 的 5 个周期汉宁窗调制正弦波作为激励信号, 输入管道左端换能器阵列中的任一阵元, 在管道中激发单一 S_0 模态兰姆波, 此兰姆波为柱面波前, 在管道上产生螺旋传播导波, 并被接收信号的电磁超声阵列换能器接收, 阵元位置及编号与图 5 中所示的定义相同。各阵元采集信号时采用平均 256 次的方法消除随机噪声, 平均后的信号作为检测信号, 各通道采样频率为 50 MHz。采集到的检测信号不作任何信号处理, 直接进行分析。

3 结果与分析

3.1 螺旋导波各阶波包的到达时间

实验中置于 0.5、1、2、3 m 和 4 m 处的接收电磁超声换能器阵列采集到的检测信号如图 9~13 所示, 图中横坐标为信号时间轴, 左侧纵坐标为接收信号电压值, 右侧纵坐标标出了各通道的编号, 为了保证管道的连续性, 在最上端复制了通道 1 的信号。值得指出的是当叠加显示时, 图 9 中 0.5 m 处接收信号波包幅值较强, 相邻两个通道基线电压差为 1 V, 图 10~13 中, 相邻两个通道基线电压差为 0.5 V。从图 9~13 中可知, 检测信号具有良好的信噪比, 同时具有明显的分布规律。

图 9~13 中圆圈标示出了采用 1.2 节中提出的空间拓展法计算得到的前 4 阶螺旋导波到达波包的起始点, 虚线为将沿管道周向排列的各通道波包到达时间点连接起来形成的波前图, 圆点位置及波前与图 6 和图 7 中所示相同。从图中可知, 数值计算结果得到的波包到达时间与实验测量得到的波包到达时间完全对应, 证明了文中提出的管道高阶螺旋传播模式导波的传播路径计算模型的正确性, 基于此模型得到的波包传播路径解析解, 可以用于进

行各个通道、各阶螺旋导波波包的追踪,并示出重叠波包。

由于检测频厚积选在了 $1\ 020\ \text{kHz}\cdot\text{mm}$,且激发信号总是有一定的带宽,从图 4 的频散曲线中可知, S_0 模态群速度在此频厚积附近变化较大,波包在传播过程中将会发生较严重的频散现象。如图 9 中所

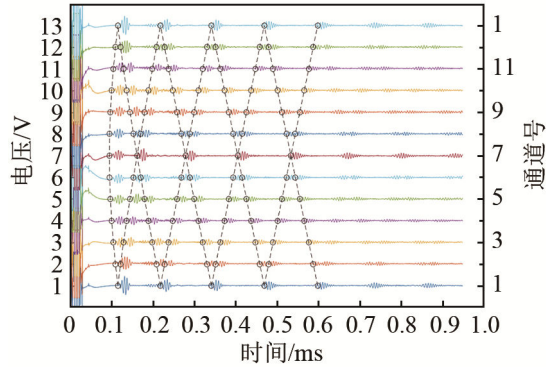


图 9 管道上距阵元 0.5 m 处测得的螺旋导波检测信号及前 4 阶波包到达时间数值计算结果

Fig.9 The helical guided wave signals received by the transducer array located at 0.5 m and the calculated 0~4 order wave packet arriving time

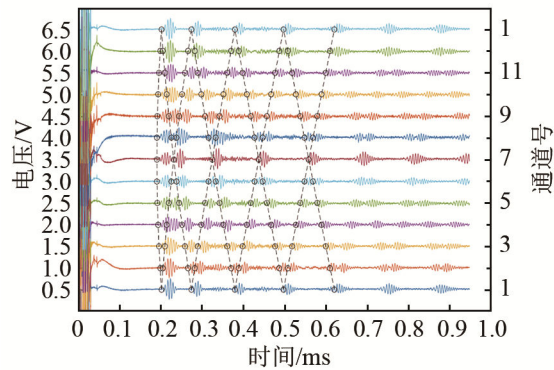


图 10 管道上距阵元 1 m 处测得的螺旋导波检测信号及前 4 阶波包到达时间数值计算结果

Fig.10 The helical guided wave signals received by the transducer array located at 1 m and the calculated 0~4 order wave packet arriving time

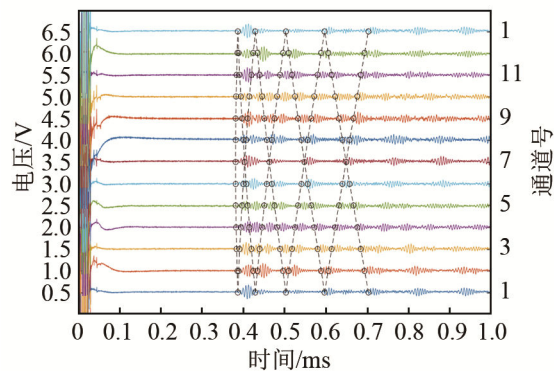


图 11 管道上距阵元 2 m 处测得的螺旋导波检测信号及前 4 阶波包到达时间数值计算结果

Fig.11 The helical guided wave signals received by the transducer array located at 2 m and the calculated 0~4 order wave packet arriving time

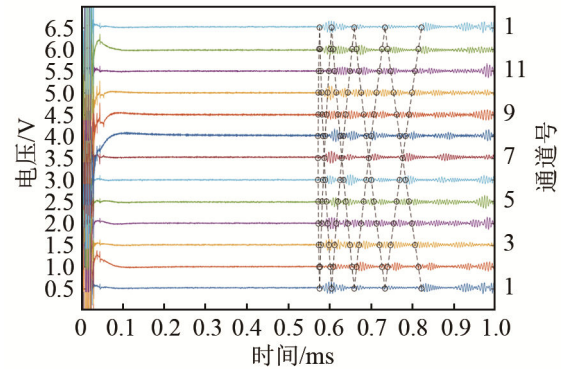


图 12 管道上距阵元 3 m 处测得的螺旋导波检测信号及前 4 阶波包到达时间数值计算结果

Fig.12 The helical guided wave signals received by the transducer array located at 3 m and the calculated 0~4 order wave packet arriving time

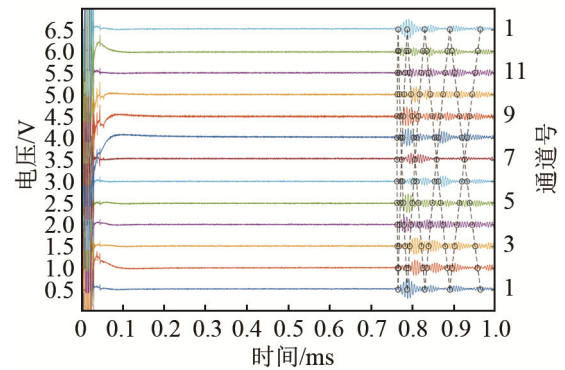


图 13 管道上距阵元 4 m 处测得的螺旋导波检测信号及前 4 阶波包到达时间数值计算结果

Fig.13 The helical guided wave signals received by the transducer array located at 4 m and the calculated 0~4 order wave packet arriving time

示,0 阶和 1 阶螺旋导波波包的频散很小,几乎难以观察到,但从 2 阶螺旋导波开始,波包的频散变得越来越大。由于频散程度是跟传播距离相关的,从图 12 和图 13 中可以明显地看出,位于 3 m 和 4 m 处的换能器阵列采集的信号,即使是 0 阶和 1 阶螺旋导波,其波包的频散程度也较大。频散的存在,会使得实验中采用波包包络线最大值来确定波包到达时间的方法变得不准确,而采用文中提出的波包追踪方法,可以方便地确认出波包的到达时间和所属阶数。

3.2 螺旋导波波包分布特点

从模型计算结果及实验结果可知,无论在哪一个距离上,左行和右行的螺旋导波波前总会在过激励源的轴线及与其正对的背部轴线处形成交叉,形成波节点。表现在图 9~13 中通道 7(与激励源在同一轴线上)和通道 1(位于与激励源所在轴线正对的背部轴线上)上各阶螺旋导波只有一个波包,即左行和右行波包重合。而其它通道上,各阶螺旋导波左

行与右行波包分离, 每阶螺旋导波均有两个波包。各阶导波的到达时间连线(图中虚线)在通道 7 和通道 1 处发生交叉。

以波节点所在通道为对称轴(通道 7 和通道 1), 波包呈现严格的对称分布, 这主要是由柱面波前的均匀性及管道结构的对称性形成的。因此管道上螺旋导波的波包分布有两个对称轴, 分别为过激励源的轴线和与其正对的背部轴线。在与对称轴邻近的通道上接收到的各阶信号波包, 左行波包与右行波包往往较易发生一定的重叠, 且采集距离越远, 重叠程度越大。

随着接收换能器阵列距激发换能器距离的增加, 前几阶螺旋导波之间的到达时间差逐渐减小, 表现为从图 9~13, 前四阶螺旋导波的到达时间连线及波包逐渐压缩到了一起。可以推断, 随着接收换能器阵列位置的进一步拉远, 前几阶螺旋导波的到达时间会进一步压缩, 对于无穷远处, 前 N 阶螺旋导波的到达时间连线可以认为重合或以极小的间距平行分布着。从物理的角度分析其原因为, 随着传播距离的增加, 柱面波前导波的波阵面不断扩散, 在局部将可近似为平面波前, 而在远处的前几阶螺旋导波的波前, 可以认为是柱面波前的局部, 从而可近似为平面波, 各通道采集到的前几阶螺旋导波波包到达的时间几乎相等。

上面分析了远处前几阶螺旋导波波包重叠的趋势, 事实上在本文实验的例子中, 如图 13 所示的 4 m 处, 前 2 阶波包已发生较为严重的重叠, 单从实验信号上无法得到各阶波包的到达时间。这也使得依赖于波包到达时间进行波速计算, 从而实现壁厚层析成像的方法不可行, 故而管道超声导波层析成像只适用于较短的距离, 能够从信号上明确地分辨出各阶螺旋导波的到达时间。

4 结论

本文阐述了管道螺旋导波的形成及传播特征, 建立了基于空间拓展法计算螺旋传播导波路径的物理模型, 得到了解析表达式, 建立起了计算高阶螺旋传播模态导波波包到达时间的方法, 实现了螺旋导波检测信号的追踪。组建了管道阵列电磁超声导波检测实验系统, 实验验证了空间拓展法计算模型及表达式。得到以下结论:

(1) 文中推导的基于空间拓展法的管道螺旋导波路径计算模型及公式, 经数值计算结果与实验结果验证表明了其正确性。该模型可以用于管道高阶螺旋导波的波包追踪, 适用于管道任意位置处换能

器接收到的螺旋导波信号波包的分析。

(2) 在实际检测中, 由于导波的频散特性及螺旋导波的多路径传播特性, 换能器接收到的检测信号经常发生重叠, 特别是接收换能器与激励换能器距离较远时, 前几阶螺旋导波波包重叠严重, 波包追踪对于信号的分析具有重要的意义。

(3) 螺旋导波在管道周向上具有严格的对称性, 对称中心以波节点所在通道为对称轴, 即激励换能器所在轴线及管道另一侧与之正对的轴线。

(4) 随着传播距离的增加, 低阶螺旋导波波前逐渐压缩在一起, 低阶波包也发生了较严重的重叠, 因此, 基于螺旋导波进行的层析成像主要用于几米范围内的短距离高精度检测, 而难以用于长距离大范围检测。

参 考 文 献

- [1] THOMPSON R B, ALERS G A, TENNISON M A. Application of direct electromagnetic Lamb wave generation to gas pipeline inspection[J]. Ultrasonics Symposium, 1972, 1972(1): 91-94.
- [2] PIERCE A D, KIL H G. Elastic wave propagation from point excitations on thin-walled cylindrical shells[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1990, 112(3): 399-406.
- [3] CAWLEY P, LOWE M J S, ALLEYNE D N, et al. Practical long range guided wave testing: applications to pipes and rail[J]. Materials Evaluation, 2003, 61(1): 66-74.
- [4] ALLEYNE D N, PAVLAKOVIC B, LOWE M J S, et al. Rapid, long range inspection of chemical plant pipework using guided waves[J]. Advances in Nondestructive Evaluation, Pt 1-3, 2004, 270-273(1): 434-441.
- [5] ROSE J L. A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential[J]. Journal of Pressure Vessel Technology Transactions of the ASME, 2002, 124(3): 273-282.
- [6] BRATH A J, SIMONETTI F, NAGY P B, et al. Guided wave tomography of pipe bends[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2017, 64(5): 847-858.
- [7] WILLEY C L, SIMONETTI F, NAGY P B, et al. Guided wave tomography of pipes with high-order helical modes[J]. Ndt & E International, 2014, 65(3): 8-21.
- [8] NERI E D, SALAMONE S. A multi-helical ultrasonic imaging approach for the structural health monitoring of cylindrical structures[J]. Structural Health Monitoring-an International Journal, 2015, 14(1): 73-85.
- [9] HUTHWAITE P, SEHER M. Robust helical path separation for thickness mapping of pipes by guided wave tomography[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics And Frequency Control, 2015, 62(5): 927-938.
- [10] 郑阳. 基于散射系数矩阵法的超声 Lamb 波与典型缺陷交互作用研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
ZHENG Yang. Interaction of lamb wave with typical defects using scattering parameter matrix[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.
- [11] 何存富, 郑阳, 周进节, 等. 基于激光测振仪的兰姆波离面和面内位移检测[J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 6-11.
HE Cunfu, ZHENG Yang, ZHOU Jinjie, et al. In-plane and out-of-plane displacement of lamb waves test with laser vibrometer [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 6-11.