

DOI: 10.3901/JME.2015.12.016

波源对纵向模态导波在管道中传播的影响研究*

胡剑虹¹ 唐志峰² 吕福在¹ 潘晓弘¹ 姜晓勇³

(1. 浙江大学现代制造工程研究所 杭州 310027;

2. 浙江大学数字技术及仪器研究所 杭州 310027;

3. 杭州浙达精益机电技术股份有限公司 杭州 310030)

摘要: 针对波源对纵向模态导波在管道中传播的影响问题,建立改进的管道纵向模态导波半解析有限元(Semi-analytical finite element, SAFE)模型,相对先前的SAFE模型,实现纵向模态导波的单独计算求解,提高了计算效率。在此基础上,利用正交模态展开法建立波源对纵向模态导波在管道中传播影响的数学模型,分析数学模型可以看到纵向模态导波的幅值取决于导波的波结构和波源特性。为论证波源对纵向模态导波在管道中传播影响的数学模型,通过数值计算和试验方法,从相同波源激励的不同纵向模态导波之间的幅值关系和不同波源激励的同一模态导波之间的幅值关系两个方面开展研究工作。对比数值计算结果和试验结果,说明建立的波源对纵向模态导波在管道中传播影响的数学模型是可信的。研究结论为设计合适的导波传感器实现在管道中激励特定的纵向模态导波奠定了基础。

关键词: 改进的半解析有限元模型; 纵向模态导波; 管道; 波源影响

中图分类号: O347; U216

Source Influence Analysis of Longitudinal Mode Guided Waves Propagating in Pipeline

HU Jianhong¹ TANG Zhifeng^{1,2} LÜ Fuzai¹ PAN Xiaohong¹ JIANG Xiaoyong³

(1. Institute of Advanced Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027;

2. Institute of Advanced Digital Technologies and Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027;

3. Hangzhou Zheda Jingyi Electromechanical Technology Limited Company, Hangzhou 310030)

Abstract: The improved semi-analytical finite element(SAFE) model for longitudinal mode guided waves in pipeline is built to research the source influence on longitudinal mode guided waves. Comparing with previous SAFE models, the improved SAFE model can compute longitudinal mode guided waves independently, which significantly improves the computational efficiency. The mathematical model for source influence on longitudinal mode guided waves is built based on the normal mode expansion technique. The model shows the amplitudes of longitudinal mode guided waves depend on the wave structures of guided waves and the characteristics of sources. The numerical calculations and experiments are done to research two questions, one is the amplitude relationships of different longitudinal mode guided waves excited by the same source, the other one is the amplitude relationships of a certain mode longitudinal mode guided wave excited by different sources. The experimental results accord with numerical ones, which shows the correctness of the mathematical model. The conclusions lay the foundations for exciting a certain longitudinal mode guided wave in pipeline by designing suitable transducers.

Key words: improved semi-analytical finite element (SAFE) model; longitudinal mode guided waves; pipeline; source influence

0 前言

近年来,导波检测技术在管道的无损检测中有着广泛的应用。纵向模态导波波结构简单,具备较好的检测灵敏度,是管道导波检测中比较常用的导

波模态^[1-5]。根据导波的频散特性,管道中可能存在多种纵向模态导波,而在管道超声导波检测中往往希望产生特定模态的导波。为了解决这个问题,必须分析波源对纵向模态导波在管道中传播的影响^[6]。

波源对导波传播影响的研究建立在导波频散特性基础上,结合正交模态展开法进行分析。早期的研究以ROSE等^[6-7]成果较为典型,他们利用传播矩阵法和全局矩阵法分析了导波的频散特性,应用正交模态展开法分析了波源对导波传播的影响。由

* 国家自然科学基金(51275454, 61271084)、质检公益性行业科研专项(20140027)和中央高校基本科研业务费专项资助项目。20140613收到初稿,20141205收到修改稿

于传播矩阵法和全局矩阵法分析导波频散特性的过程过于复杂, GAO 等^[8-10]采用了半解析有限元 (Semi-analytical finite element, SAFE) 方法以提高导波的频散特性的计算效率, 并在此基础上结合正交模态展开法建立了波源对导波传播影响的数学模型。但是上述工作的研究对象均为层状结构中的导波, 其数学模型基于笛卡儿坐标系。此外, 先前的工作都仅仅局限于理论分析, 没有结合实际导波信号对数学模型进行论证。

本文针对波源对纵向模式导波在管道中传播的影响问题开展研究, 将先前的基于笛卡儿坐标系的波源对导波在层状结构中传播影响的数学模型拓展应用到管道结构, 在此基础上利用管道中纵向模式导波的力学特性对数学模型进行优化。本文首先利用管道中纵向模式导波的力学特性对先前 SAFE 模型^[11]进行改进, 克服了先前 SAFE 模型无法直接对纵向模式导波进行单独求解, 需要在求解后再进行模态辨识的缺点, 提高了计算效率。然后基于圆柱坐标系描述正交模态展开法分析过程, 并利用纵向模式导波的力学特性对正交模态展开法进行简化。最后设计试验以检验本文建立的波源对纵向模式导波在管道中传播影响的改进数学模型。

1 理论分析

1.1 改进的纵向模式导波 SAFE 模型

管道中纵向模式导波传播如图 1 所示, 导波沿 z 轴方向传播, 其波数为 k , 频率为 ω 。由于管道的旋转对称性, 纵向模式导波所有的力学参数(位移、应变和应力等)均独立于变量 θ , 即位移分量 u_θ , 应变分量 $\varepsilon_{r\theta}$ 和 ε_{rz} , 应力分量 $\sigma_{r\theta}$ 和 σ_{rz} 均为 0。因此位移矢量、应变矢量和应力矢量可以分别记作

$$\mathbf{u} = (u_r \quad u_z)^T \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_{rr} \quad \varepsilon_{\theta\theta} \quad \varepsilon_{zz} \quad \varepsilon_{zr})^T \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_{rr} \quad \sigma_{\theta\theta} \quad \sigma_{zz} \quad \sigma_{zr})^T \quad (3)$$

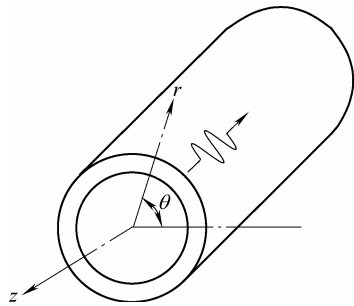


图 1 纵向模式导波在管道中的传播

根据 SAFE 方法的基本原理, 在管道截面采用

有限元网格表示, 在导波的传播方向(管道轴线方向)采用谐波假设。由于纵向模式导波所有的力学参数均独立于 θ , 截面的 2D 有限元网格可以简化为 1D 网格。管道截面的有限元网格划分如图 2 所示。

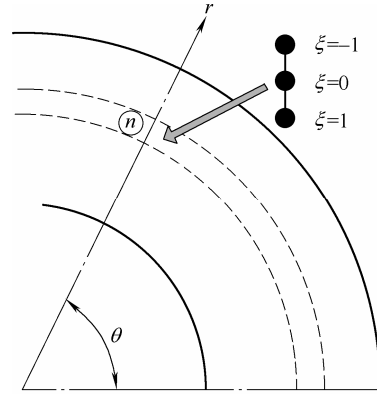


图 2 管道截面的有限元网格划分

通过有限元法, 第 n 个网格单元中质点的位移 $\mathbf{u}^{(e)}$ 可以由节点位移 $\mathbf{Q}^{(e)}$ 表示成

$$\mathbf{u}^{(e)} = \mathbf{N} \cdot \mathbf{Q}^{(e)} \quad (4)$$

式中 \mathbf{N} ——形函数矩阵。

对于纵向模式导波, 形函数矩阵 \mathbf{N} 可以表示成

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} \frac{\xi^2 - \xi}{2} & 0 & 1 - \xi^2 & 0 & \frac{\xi^2 + \xi}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\xi^2 - \xi}{2} & 0 & 1 - \xi^2 & 0 & \frac{\xi^2 + \xi}{2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中 ξ ——自然坐标参数。

节点位移 $\mathbf{Q}^{(e)}$ 可以记作

$$\mathbf{Q}^{(e)} = (u_{r1} \quad u_{z1} \quad u_{r2} \quad u_{z2} \quad u_{r3} \quad u_{z3})^T \exp(i(kz - \omega t)) \quad (6)$$

根据应变与位移之间的关系, 第 n 个网格单元中质点的应变矢量 $\boldsymbol{\varepsilon}^{(e)}$ 可以表示成

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(e)} = (ik\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2) \mathbf{Q}^{(e)} \quad (7)$$

\mathbf{B}_1 和 \mathbf{B}_2 分别可以表示成

$$\mathbf{B}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\xi^2 - \xi}{2} & 0 & 1 - \xi^2 & 0 & \frac{\xi^2 + \xi}{2} \\ \frac{\xi^2 - \xi}{2} & 0 & 1 - \xi^2 & 0 & \frac{\xi^2 + \xi}{2} & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{pmatrix} \frac{2\xi - 1}{L} & 0 & \frac{-4\xi}{L} & 0 & \frac{2\xi + 1}{L} & 0 \\ \frac{\xi^2 - \xi}{2r} & 0 & \frac{1 - \xi^2}{r} & 0 & \frac{\xi^2 + \xi}{2r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2\xi - 1}{L} & 0 & \frac{-4\xi}{L} & 0 & \frac{2\xi + 1}{L} \end{pmatrix}$$

式中 L ——第 n 个网格单元的长度。

根据 Hooke 定理, 应力矢量 $\sigma^{(e)}$ 可以表示成

$$\sigma^{(e)} = C^{(e)} \varepsilon^{(e)} \quad (8)$$

式中 $C^{(e)}$ ——第 n 个网格单元的弹性矩阵。

根据虚功原理可以获得无外载荷下管道中纵向模态导波传播的控制方程

$$\int_V \delta u^{(e)T} \rho^{(e)} \ddot{u}^{(e)} dV + \int_V \delta \varepsilon^{(e)T} \sigma^{(e)} dV = 0 \quad (9)$$

式中 V ——网格单元的体积;

$\rho^{(e)}$ ——第 n 个网格单元的密度

$\ddot{u}^{(e)}$ ——位移 $u^{(e)}$ 相对时间变量 t 的二阶导数。

式(9)左侧的第一项和第二项分别代表第 n 个网格单元的动能增量和应变能增量。

将式(4)、(7)、(8)代入纵向模态导波控制方程式(9), 可以得到

$$(k^2 K_1^{(e)} + ikK_2^{(e)} + K_3^{(e)} - \omega^2 M^{(e)}) Q^{(e)} = 0 \quad (10)$$

$$K_1^{(e)} = \int_{r_i^{(e)}}^{r_o^{(e)}} B_1^{(e)T} C^{(e)} B_1^{(e)} r dr$$

$$K_2^{(e)} = \int_{r_i^{(e)}}^{r_o^{(e)}} (-B_1^{(e)T} C^{(e)} B_2^{(e)} + B_2^{(e)T} C^{(e)} B_1^{(e)}) r dr$$

$$K_3^{(e)} = \int_{r_i^{(e)}}^{r_o^{(e)}} B_2^{(e)T} C^{(e)} B_2^{(e)} r dr$$

$$M^{(e)} = \int_{r_i^{(e)}}^{r_o^{(e)}} \rho^{(e)} N^T N r dr$$

通过矩阵组装技术, 可以获得全局控制方程

$$(k^2 K_1 + kK_2 + K_3 - \omega^2 M) Q = 0 \quad (11)$$

式中 K_1 , K_2 , K_3 ——全局刚度矩阵;

M ——全局质量矩阵。

对于给定的频率 ω , 通过纵向模态导波控制方程式(11), 可以找到对应的波数 k 。式(11)是一个二阶特征方程, 为了便于计算, 可以将其简化成一阶特征方程

$$(A - kB) \begin{pmatrix} Q \\ kQ \end{pmatrix} = 0 \quad (12)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & K_3 - \omega^2 M \\ K_3 - \omega^2 M & K_2 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} K_3 - \omega^2 M & 0 \\ 0 & -K_1 \end{pmatrix}$$

式(12)表达了频率 ω 与波数 k 之间的关系, 即频散关系。对于给定的 ω , 可以求解出 $2m$ (m 为系统的总自由度)个特征值 k 以及对应的特征矢量。

与先前的 SAFE 模型相比较, 改进的纵向模态导波 SAFE 模型结合了纵向模态导波的力学特性, 其计算结果仅包含纵向模态解, 不包含扭转模态和弯曲模态解, 这使得改进的 SAFE 模型相对先前的 SAFE 模型的计算量大幅减少。以式(11)中的全局刚度矩阵 K_1 、 K_2 、 K_3 和 M 为例, 若有限元网格节点数为 n , MU 等^[11]的 SAFE 模型中上述全局刚度矩阵规模为 $3n \times 3n$, 改进的 SAFE 模型为 $2n \times 2n$, 使得特征方程的求解效率大大提高。

对于复数解 k , 其实部 $\text{Re}(k)$ 和虚部 $\text{Im}(k)$ 分别表示波数和衰减。相速度 c_p 和衰减 a_{tt} 可以表示成

$$c_p = \frac{\omega}{\text{Re}(k)} \quad (13)$$

$$a_{tt} = \text{Im}(k) \quad (14)$$

对于弹性介质, 群速度代表了导波能量传递的速度。按照定义, 群速度为频率 ω 相对波数 k 的微分, 这种求解方式会使得群速度的计算精度受 ω - k 关系影响。为了避免这种现象, 采用 Bartoli 的方法^[12], 群速度可以用式(12)特征方程的左特征矢量 Q_L 、右特征矢量 Q_R 结合全局刚度矩阵和质量矩阵表示成

$$c_g = \frac{Q_L^T (2kK_1 + K_2) Q_R}{2\omega Q_L^T M Q_R} \quad (15)$$

1.2 波源影响的正交模态展开法分析

管道导波传感器的尺寸都是一个有限值, 如图 3 所示。因此, 管道导波传感器可以视作一个有限波源。

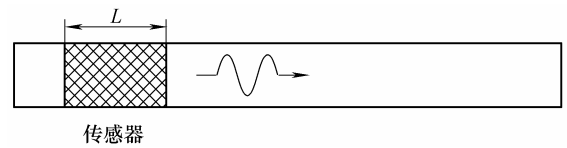


图 3 实际检测中管道纵向模态导波传播示意图

基于正交模态展开法, 受载波导中纵向模态导波的速度矢量 $v(r, z)$ 和应力矢量 $\sigma(r, z)$ 可以分别表示成自由波导所有正交纵向模态导波的速度矢量 $v_\mu(r)$ 和应力矢量 $\sigma_\mu(r)$ 之和, 即

$$v(r, z) = \sum_{\mu} a_{\mu}(z) \cdot v_{\mu}(r) \quad (16)$$

$$\sigma(r, z) = \sum_{\mu} a_{\mu}(z) \cdot \sigma_{\mu}(r) \quad (17)$$

式中 $a_{\mu}(z)$ —— μ 阶纵向模态导波的幅值系数。

结合谐波表达式, 管道 v 阶纵向模态导波的速度矢量 $v_v(r, z)$ 和应力矢量 $\sigma_v(r, z)$ 可以表示成

$$\mathbf{v}_v(r, z) = \mathbf{v}_v(r) \cdot \exp(i(kz - \omega t)) \quad (18)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_v(r, z) = \boldsymbol{\sigma}_v(r) \cdot \exp(i(kz - \omega t)) \quad (19)$$

应用互易关系原理, 有

$$\nabla \cdot [\tilde{\mathbf{v}}_v(r, z) \boldsymbol{\sigma}(r, z) + \mathbf{v}(r, z) \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_v(r, z)] = 0 \quad (20)$$

由于管道纵向模态导波的力学参数独立于 θ , 式(20)可以改写成

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial r} [\tilde{\mathbf{v}}_v(r, z) \boldsymbol{\sigma}(r, z) + \mathbf{v}(r, z) \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_v(r, z)] \cdot \hat{\mathbf{e}}_r = \\ & - \frac{\partial}{\partial z} [\tilde{\mathbf{v}}_v(r, z) \boldsymbol{\sigma}(r, z) + \mathbf{v}(r, z) \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_v(r, z)] \cdot \hat{\mathbf{e}}_z \quad (21) \end{aligned}$$

式中 $\hat{\mathbf{e}}_r$ —— r 方向单位矢量;

$\hat{\mathbf{e}}_z$ —— z 方向单位矢量。

对式(21)两侧沿管道壁厚积分, 有

$$\begin{aligned} & \int_{r_i}^{r_o} \frac{\partial}{\partial r} [\tilde{\mathbf{v}}_v(r, z) \boldsymbol{\sigma}(r, z) + \mathbf{v}(r, z) \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_v(r, z)] \cdot \hat{\mathbf{e}}_r dr = \\ & - \int_{r_i}^{r_o} \frac{\partial}{\partial z} [\tilde{\mathbf{v}}_v(r, z) \boldsymbol{\sigma}(r, z) + \mathbf{v}(r, z) \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_v(r, z)] \cdot \hat{\mathbf{e}}_z dr \quad (22) \end{aligned}$$

将式(16)~(19)代入式(22), 可以得到

$$4\mathbf{P}_{vv} \left(\frac{\partial}{\partial z} + ik \right) a_v(z) = \tilde{\mathbf{v}}_v(r_o) \mathbf{t}(z) \quad (23)$$

式中 $\mathbf{t}(z)$ ——管道外表面受到的载荷;

\mathbf{P}_{vv} —— v 阶纵向模态导波沿 z 方向的时间平均功率流。

\mathbf{P}_{vv} 可以表示成

$$\mathbf{P}_{vv} = \text{Re} \left(-\frac{1}{2} \int_{r_i}^{r_o} \tilde{\mathbf{v}}_v(r) \boldsymbol{\sigma}_v(r) \cdot \hat{\mathbf{e}}_z dr \right) \quad (24)$$

式(23)是一个一阶常微分方程, 如果外载荷在区间 $\left[-\frac{L}{2}, \frac{L}{2}\right]$ 以外为 0, 那么对于导波传感器右侧的导波传播, 有

$$a_v(z) = \frac{\exp(ikz)}{4\mathbf{P}_{vv}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \exp(-ik\eta) \tilde{\mathbf{v}}_v(r_o) \mathbf{t}(\eta) d\eta \quad (25)$$

从式(25)可以看到, v 阶纵向模态导波的幅值系数取决于导波的波结构和波源特性, v 阶纵向模态导波的波结构可以通过改进的纵向模态导波 SAFE 模型计算。此外, 根据式(25), 可以设计试验从两个方面检验本文建立的波源对纵向模态导波在管道中传播影响的数学模型: 一是相同波源激励的不同纵向模态导波之间的幅值关系, 即固定波源参数, 研究不同的波结构对导波幅值的影响; 二是不同波源激励的同一模态导波之间的幅值关系, 即固定波结构, 研究波源参数对导波幅值的影响。

2 数值计算与试验研究

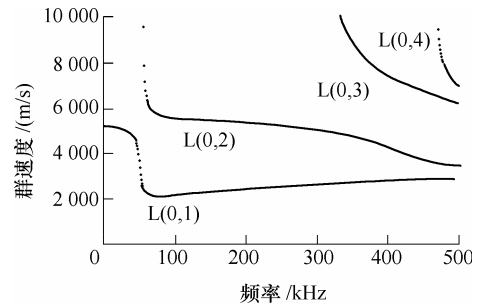
2.1 钢管频散特性计算

本文研究采用的钢管为 20 号钢管, 其尺寸和材料特性如表 1 所示。

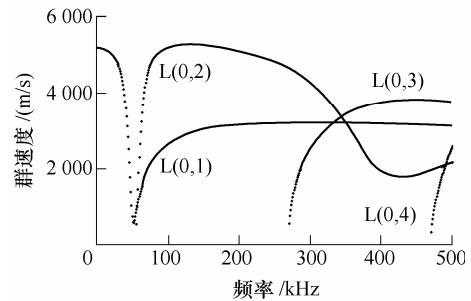
表 1 20 号钢管的尺寸及材料特性

参数	数值
外径 r_{out}/mm	19
内径 r_{in}/mm	13
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7 800
弹性模量 E/GPa	210
泊松比 ν	0.3

根据管道纵向模态导波的改进 SAFE 模型, 可以计算 20 号钢管的相速度频散曲线和群速度频散曲线, 其结果如图 4 所示。



(a) 相速度频散曲线



(b) 群速度频散曲线

图 4 20 号钢管频散曲线

从图 4 的频散曲线可以看到, 180 kHz 附近的频散曲线比较平缓, 这说明 180 kHz 导波的频散较小, 而且 180 kHz 时 L(0,1)和 L(0,2)两种模态导波并存, 适合研究相同波源激励的 L(0,1)和 L(0,2)模态导波之间的幅值关系。另外, L(0,2)的截止频率约为 55 kHz, 故本文选择 32 kHz 的 L(0,1)模态导波和 128 kHz 的 L(0,2)模态导波以研究不同波源激励的 L(0,1)或 L(0,2)模态导波之间的幅值关系。

2.2 导波试验系统概述

本文的导波试验系统基于磁致伸缩原理, 系统组成如图 5 所示。计算机控制信号发生模块产生激

励脉冲信号,经过功率放大模块放大后加载到线圈,线圈的磁场和偏置磁体的磁场共同作用,由磁致伸缩效应在钢管上激励出导波。线圈通过逆磁致伸缩效应感应导波回波,经过信号放大模块放大后,由数据采集模块进行 A/D 转换,将数据形式的导波信号发送到计算机,由计算机对导波信号进行进一步处理。

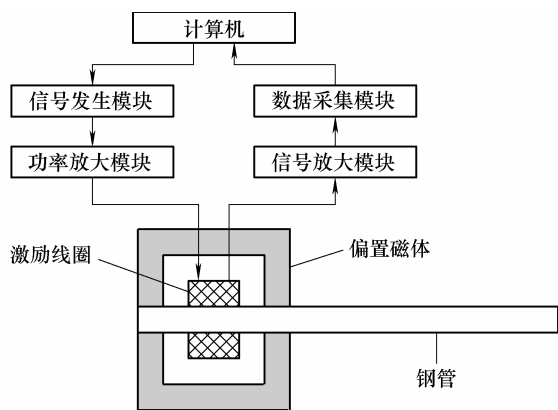


图 5 导波试验系统组成

本文采用脉冲回波方式进行导波试验,试验使用的纵向模式导波磁致伸缩传感器的结构如图 6 所示。由钕铁硼永磁体、磁轭和鞍片等构成的偏置磁体在管道中形成一个偏置磁场,与通过脉冲电流的线圈形成的激励磁场共同作用,根据磁致伸缩效应及其逆效应实现导波的激励与接收。纵向模式导波磁致伸缩传感器激励和接收导波的详细过程可参考文献[13]。此外,纵向模式导波磁致伸缩传感器在管道中的安装位置如图 7 所示,传感器线圈的中心在距离管道端面 2 m 处。

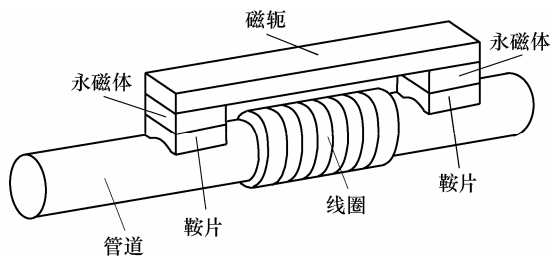


图 6 纵向模式磁致伸缩导波传感器

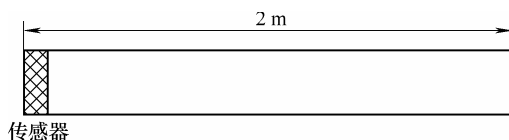


图 7 导波传感器安装位置

2.3 相同波源激励的不同纵向模式导波之间的幅值关系

根据第 2.1 节分析,180 kHz 时 20 钢管中 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 两种模式导波并存,故采用第 2.2 节

所述的导波试验系统在 20 钢管中激励导波时可以同时激励出 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 两种模式导波。

根据管道纵向模式导波的 SAFE 模型,可以计算频率为 180 kHz 时 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 两种模式导波的波结构,如图 8 所示。根据谐波表达式和弹性力学理论,可以进一步计算 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 的速度场和应力场,在此基础上,通过式(24)、(25)可以计算出 20 钢管中 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模式导波的相对幅值,其结果以及相应的 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模式导波群速度见表 2 的数值计算结果。

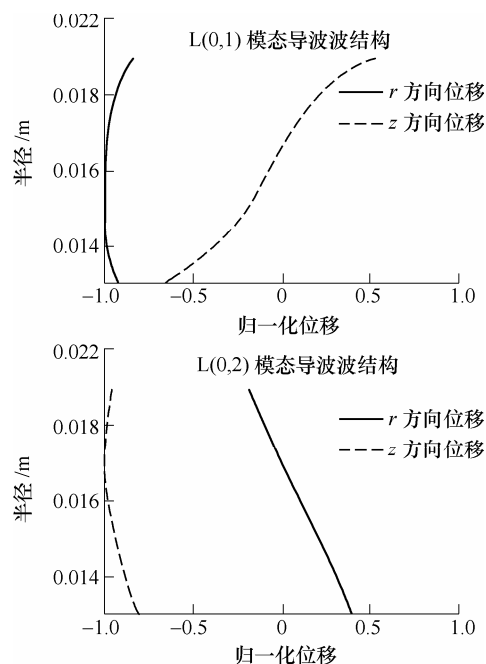


图 8 20 钢管 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模式导波波结构(180 kHz)

表 2 数值计算和试验结果

方法	群速度/(m/s)		相对幅值 $L(0,2)/L(0,1)$
	$L(0,1)$	$L(0,2)$	
数值计算	3 102	5 177	0.713
试验	3 039	5 133	0.604

为检验数值计算的结果,本文利用第 2.2 节所述的导波试验系统进行试验,试验采用的传感器线圈宽度为 127 mm,导波频率为 180 kHz,试验系统获得的 20 钢管端面导波信号如图 9 所示。

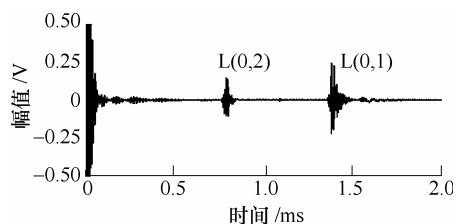


图 9 20 钢管 180 kHz 导波信号

从图 9 导波信号可以获得 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模式导波的实测群速度以及 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模式导波的

实测相对幅值, 其中实测群速度根据初始脉冲信号波包和端面信号波包的波包前位置计算, 实测结果如表 2 所示。

对比表 2 中数值计算结果和试验结果。

(1) $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模态导波群速度的数值计算结果和试验结果基本一致, 因为群速度是辨识导波信号模式的重要依据, 所以可以确定实测导波信号的两个波包分别为端面的 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模态导波回波。

(2) 20 钢钢管端面 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模态导波的实测相对幅值与数值计算结果基本符合, 通过端面导波信号的试验结果说明本文建立的理论模型计算相同波源激励的不同纵向模态导波之间的幅值关系是正确的。

2.4 不同波源激励的同一模态导波之间的幅值关系

为了研究不同波源激励的同一模态导波之间的幅值关系, 对式(24)、(25)进行分析可以看到, 当导波的模态确定后, 即导波波结构确定后, 外载荷的大小和作用区间会影响导波的幅值。从磁致伸缩导波传感器的角度看, 磁致伸缩微位移大小和线圈的宽度会影响导波的幅值。由于磁致伸缩传感器的非线性以及微位移不易测量, 故无法实现对磁致伸缩微位移大小进行控制。因此, 本文控制安匝数恒定(激励信号电流大小和线圈匝数恒定)以保证磁致伸缩导波传感器产生的微位移为固定值, 通过改变线圈绕线区域的宽度(此时线圈总匝数不变)来研究不同波源激励的同一模态导波之间的幅值关系。

根据第 2.1 节分析, 本文选择频散曲线较为平坦的 32 kHz, $L(0,1)$ 模态导波和 128 kHz, $L(0,2)$ 模态导波, 研究不同绕线宽度线圈对导波幅值的影响。本文采用的线圈绕线宽度分别为 127 mm、254 mm 和 508 mm, 由式(24)和式(25)可知, 固定于导波波结构和载荷大小有关的参数后, 可以计算不同线圈宽度的磁致伸缩导波传感器激励的导波的相对幅值。根据数学模型计算的导波群速度和相对幅值数值计算结果如表 3、4 所示。

在第 2.2 节所述的导波试验系统中, 用匝数相同, 绕线宽度分别为 127 mm、254 mm 和 508 mm 的磁致伸缩传感器, 在相同的激励脉冲作用下, 分别激励和接收 32 kHz, $L(0,1)$ 模态导波和 128 kHz, $L(0,2)$ 模态导波。上述试验设计保证磁致伸缩传感器线圈的安匝数恒定, 其通过磁致伸缩效应作用到钢管的载荷大小也恒定。用设置参数相同的导波试验系统分别在 32 kHz 和 128 kHz 进行试验, 实测 20 钢钢管端面导波信号如图 10、11 所示。

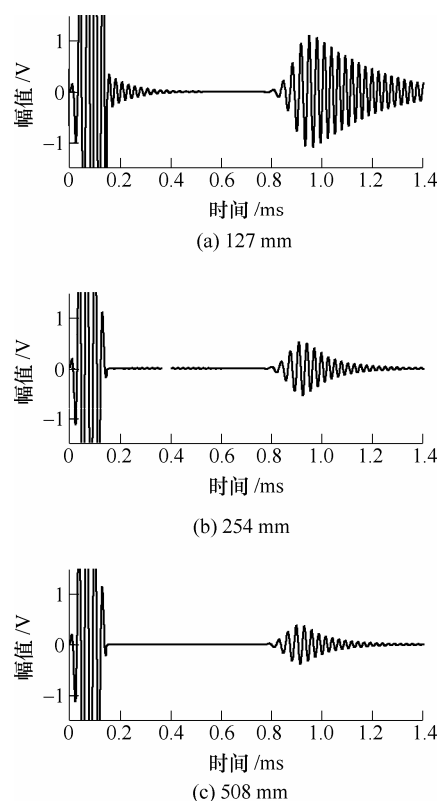


图 10 20 钢钢管 32 kHz, $L(0,1)$ 模态导波信号

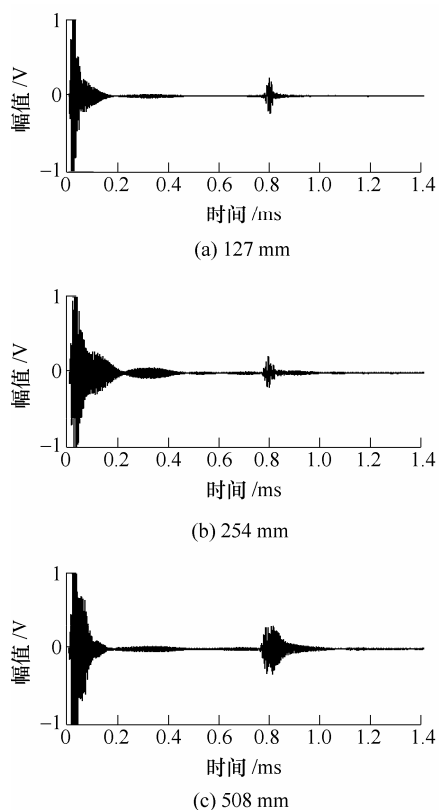


图 11 20 钢钢管 128 kHz, $L(0,2)$ 模态导波信号

以图 10 和图 11 中线圈绕线宽度为 127 mm 的导波传感器获得的导波信号为基准, 可以确定线圈绕线宽度为 254 mm 和 508 mm 的导波传感器采集信号的相对幅值, 结果如表 3 和表 4 所示。表 3 和

表 4 中, 实测群速度根据初始脉冲信号波包和端面信号波包的波包前位置计算, 其数值分别为图 10 和图 11a~11c 所示 3 个信号实测值的平均值。

表 3 32 kHz, L(0,1)模态导波的数值计算和试验结果

方法	群速度/ (m/s)	相对幅值	
		A(254 mm)/A(127 mm)	A(508 mm)/A(127 mm)
数值计算	5 047	0.516	0.295
试验	4 957	0.476	0.337

表 4 128 kHz, L(0,2)模态导波的数值计算和试验结果

方法	群速度/ (m/s)	相对幅值	
		A(254 mm)/A(127 mm)	A(508 mm)/A(127 mm)
数值计算	5 470	0.841	1.436
试验	5 295	0.944	1.192

对比表 3 和表 4 中的数值计算结果和试验结果, 可以得到以下结论。

(1) 表 3 和表 4 中, 32 kHz, L(0,1)模态导波和 128 kHz, L(0,2)模态导波群速度的数值计算结果和试验结果一致, 根据群速度可以判断图 10 中的导波为 L(0,1)模态, 图 11 中的导波为 L(0, 2)模态。

(2) 表 3 和表 4 中, 线圈绕线宽度为 254 mm 和 508 mm 的导波传感器相对线圈绕线宽度为 127 mm 的导波传感器幅值的数值计算结果和试验结果基本相符, 通过端面导波信号的试验结果验证了波源宽度对导波幅值影响的理论分析。

3 结 论

(1) 建立了管道结构改进的纵向模态导波 SAFE 模型, 相对先前的 SAFE 模型, 改进的纵向模态导波 SAFE 模型结合了纵向模态导波的力学特性, 实现了纵向模态导波的单独计算求解, 提高了计算效率。

(2) 在改进的纵向模态导波 SAFE 模型基础上, 利用正交模态展开法建立了波源对纵向模态导波在管道中传播影响的数学模型。根据数学模型, 纵向模态导波的幅值取决于导波的波结构和波源特性。

(3) 从相同波源激励的不同纵向模态导波之间的幅值关系和不同波源激励的同一模态导波之间的幅值关系两个方面, 通过数值计算和试验的方法论证了本文建立的波源对纵向模态导波在管道中传播影响的数学模型。

(4) 本文建立的波源对纵向模态导波在管道中传播影响的数学模型有助于设计合适的导波传感器实现在管道中激励特定的纵向模态导波, 同时尽可能抑制其他模态导波。

参 考 文 献

- [1] ARISTÉGUI C, LOWE M J S, CAWLEY P. Guided waves in fluid-filled pipes surrounded by different fluids[J]. *Ultrasonics*, 2001, 39(5): 367-375.
- [2] 他得安, 刘镇清. 充粘液管材中超声纵向轴对称导波的频散特性分析[J]. *声学学报*, 2005, 30(3): 193-200.
TA Dean, LIU Zhenqing. Analysis of dispersion characteristic of ultrasonic longitudinal axisymmetric guided-waves in viscous liquid-filled pipes[J]. *Acta Acustica*, 2005, 30(3): 193-200.
- [3] 刘增华, 何存富, 杨士明, 等. 充水管道中纵向超声导波传播特性的理论分析与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(3): 171-178.
LIU Zenghua, HE Cunfu, YANG Shiming, et al. Theoretical and experimental studies of longitudinal ultrasonic guided wave propagation characteristics in water-filled pipes[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(3): 171-178.
- [4] 刘增华, 吴斌, 王秀彦, 等. 带粘弹性包覆层充液管道中的超声导波纵向模态[J]. *声学学报*, 2007, 32(4): 316-322.
LIU Zenghua, WU Bin, WANG Xiuyan, et al. Longitudinal modes of ultrasonic guided waves in liquid-filled pipes with viscoelastic coatings[J]. *Acta Acustica*, 2007, 32(4): 316-322.
- [5] 林晓平, 刘增华, 雷振坤, 等. 水下带粘弹性层输油管道中纵向导波的传播特性[J]. *工程力学*, 2012, 29(4): 244-250.
LIN Xiaoping, LIU Zenghua, LEI Zhenkun, et al. Propagation of longitudinal guided waves in oil-filled and viscoelastic coating pipes surrounded by water[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(4): 244-250.
- [6] ROSE J L. *Ultrasonic waves in solid media*[M]. New York: Cambridge University Press, 1999.
- [7] AULD B A. *Acoustic fields and waves in solids*[M]. Malabar: Krieger Publishing Company, 1990.
- [8] GAO H D. *Ultrasonic guided wave mechanics for composite material structure health monitoring*[D]. Park: The Pennsylvania State University, 2007.
- [9] YAN F. *Ultrasonic guided wave phased array for isotropic and anisotropic plates*[D]. Park: The Pennsylvania State University, 2008.
- [10] 张小伟, 唐志峰, 吕福在, 等. 基于半解析有限元法的多层管超声导波数值模拟与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(8): 10-16.

- ZHANG Xiaowei, TANG Zhifeng, LÜ Fuzai, et al. Numerical simulation and experimental investigation on ultrasonic guided waves in multilayered pipes based on SAFE[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(8): 10-16.
- [11] MU J, ROSE J L. Guided wave propagation and mode differentiation in hollow cylinders with viscoelastic coatings[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 124(2): 866-874.
- [12] BARTOLI I, MARZANI A, LANZA D S F, et al. Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295(3): 685-707.
- [10] 竺冉, 唐志峰, 吕福在, 等. 磁致伸缩纵向导波传感器中偏置磁场的优化设计[J]. 传感技术学报, 2011, 24(3): 371-375.
- ZHU Ran, TANG Zhifeng, LÜ Fuzai, et al. Bias magnetic field optimization of longitudinal modes guided wave sensor based on magnetostriction[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(3): 371-375.

作者简介: 胡剑虹, 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要研究方向为超声导波无损检测技术。

E-mail: zjuhjh@126.com

唐志峰(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为无损检测技术。

E-mail: tangzhifeng@zju.edu.cn