

文章编号: 1001-4888(2018)01-0001-07

管道液体流速对超声导波 纵向模态传播的影响分析^{*}

刘增华¹, 宋振华¹, 张易农², 吴斌¹, 何存富¹

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124; 2. 北京市计量检测科学研究院, 北京 100029)

摘要: 建立了充液管道中液体流动时超声导波纵向模态的群速度频散方程, 研究了模态、激励频率对载流管道内超声导波传播的影响。在数值仿真的基础上, 利用环形压电阵列在载流管道中激励接收频率 305kHz 的 $L(0,5)$ 模态, 对纵向模态在载流管道中的传播特性进行了实验研究。研究结果表明, 载流管道内频率 305kHz 的 $L(0,5)$ 模态的群速度与液体流速呈近似线性变化。实验结果与理论分析结果相符, 该结论为载流管道流量在线测量提供了一种新方法, 为超声导波流量计的研制打下了理论基础。

关键词: 纵向模态; 载流管道; 频散曲线; 传播时间; 流量测量

中图分类号: TN249; TB553

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-018

0 引言

管道在远距离输送液体、气体等方面具有特殊的优势。在石油、化工、供水供热等领域, 管道常用于输送水等液体, 其实际流量需要被准确计量。以市政供暖计量用的超声波热量表为例, 流量计量的准确度直接影响热量的计算。作为一种新型的无损检测方法, 超声导波已经在管道检测中得到了越来越广泛的应用。而利用超声导波检测载流管道内液体流量的研究较少, 因此有必要开展管道内液体的流速对于超声导波传播的影响研究。

许多学者对管道内导波传播特性进行了分析。Gazis^[1,2]首先对空心管道内导波传播进行了研究, 推导了空心圆柱管道中导波传播的弹性解。Lafleur 等^[3]和 Pan 等^[4]在理论和实验上对充液管中超声导波轴对称模态的传播特性进行了研究。Aristégui 等^[5]研究了管道内外壁充液与不充液等四种情况下纵向模态的传播和衰减特性, 并证明了液体的存在会导致 α 模态的产生。Kwun 等^[6]对充液管道中纵向模态的频散特性进行实验分析, 当管中充液时, 信号会出现时域较宽的追随信号和模态分支的现象。刘增华等^[7]从理论与实验上对超声导波纵向模态在充水钢管和带刚性边界的水圆柱体中的传播特性进行了分析, 对超声导波模态分支现象做了深入的研究。目前, 对于管道内液体流动时超声导波传播特性的研究较少。Sato 等^[8]对充液管道内液体流动时超声导波的传播特性进行了数值和实验分析, 提出了采用超声导波测量管道内液体流量的方法。刘洁^[9]从理论与实验上研究了基于超声导波技术的小管径管道流量测量的方法, 初步研究表明管中水的流速会引起超声导波传播速度的变化。Li 等^[10]设计了新型圆锥型探头, 在小管径可溶性聚四氟乙烯管道中激励特定频率的导波, 对管内液体流速进行了测

^{*} 收稿日期: 2017-02-05; 修回日期: 2017-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51475012, 11272021, 11772014) 和北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目 (CIT&TCD201304048)

通讯作者: 刘增华 (1973—), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向为超声无损检测、结构健康监测、现代测控技术。Email: liuzenghua@bjut.edu.cn

量。然而,目前对载流管道内流量对超声导波群速度变化的相关研究较少。

本文将从理论上分析管道内液体流动时导波的群速度频散特性,选取对于液体流速变化敏感的模态和频率,利用 LJX 型热量(能)表检定装置进行实验研究,并研究管中液体流速对超声导波纵向模态传播的影响。

1 理论分析与数值计算

首先从理论上分析超声导波在载流管道中的传播特性。载流管道柱坐标理论模型如图 1 所示。液体沿管道中心线 z 轴方向传播, a 和 b 分别代表管道的内径与外径, r 表示径向距离。

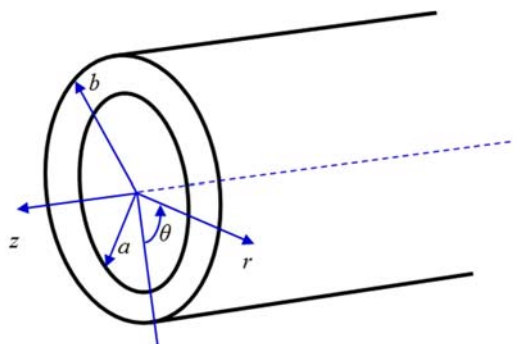


图 1 充液管道柱坐标系统理论模型

Fig. 1 Theoretical model of a fluid-filled pipe in a cylindrical coordinate system

1.1 载流管道中纵向模态的频散方程

当超声导波在管道中传播时,满足 Navier 位移运动方程,即

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

式中, μ 和 λ 为材料的 Lamé 常数; ρ 为材料密度; t 为时间; $\mathbf{u}$ 为位移场。

将位移场 $\mathbf{u}$ 分解为标量势 ϕ 和矢量势 $\mathbf{H}$,并且 $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$ 。可得

$$\mathbf{u} = \nabla \phi + \nabla \times \mathbf{H} \quad (2)$$

当只考虑纵向模态时,矢量 $\mathbf{H}$ 的径向分量和轴向分量都是零,只保留轴向分量 H_θ 。在管壁 ($a < r < b$) 上,位移场 $\mathbf{u}^f$ 可以分解为矢量 $\mathbf{H}_\theta$ 和标量 ϕ_s :

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi &= \frac{1}{v_l^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \\ \nabla^2 H_\theta - \frac{H_\theta}{r^2} &= \frac{1}{v_t^2} \frac{\partial^2 H_\theta}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 v_l 和 v_t 分别为管壁上纵波波速和横波波速。

在液体 ($0 < r < a$) 中,位移场 $\mathbf{u}^f$ 只能用标量 ϕ_f 表示,即

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^f &= \nabla \phi_f \\ \phi_f &= f_f(r) e^{i(kz - \omega t)} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可以分别得到超声导波在管壁和液体中的径向位移 u_r^s 、 u_r^f 和应力分量 σ_{rr}^s 、 σ_{rz}^s 、 σ_{rr}^f 。

在上述理论分析中,假设管道内的水流平稳且流速均匀分布为 v 。管壁中超声导波传播的相速度为 c_p ,流速为零时导波在液体中传播的相速度为 c_{pf} ,当液体以流速 v 运动时,液体中导波的相速度变为 $c_{pf} + v$ 。超声导波在载流管道中传播的示意图如图 2 所示^[8],根据充液管道中管壁与液柱中波前一致性的假设,可以得到 $c_{pf} + v = c_p$ 。其中液体中超声导波波数 $k_f = \omega / c_{pf} = \omega / (c_p - v)$,由此可以得到管壁与液体中超声导波波数之间的关系:

$$k_f = \frac{\omega k_s}{\omega - vk_s} \quad (5)$$

载流管道中超声导波传播理论分析时需要定义边界条件。 $r=b$ 是管道外壁的自由边界,各方向应

力为零。在管道内壁与液体的接触面($r=a$)上剪切应力均为零,而径向位移与径向应力均相等。同时带入各层相应的常量。由此可以得到特征方程

$$DY = 0 \quad (6)$$

式中, $Y=[A_1, A_2, B_1, B_2, C]$, D 是 5×5 的系数矩阵。其中 D_{ij} 是与管道尺寸(内径 a 与外径 b)、材料Lame常数 λ 和 μ 、密度 ρ 、频率 ω 及波数 k 有关的函数的系数。为了使式(6)有非零解,系数行列式必须为零:

$$D = 0 \quad (7)$$

式(7)即为载流管道中超声导波纵向模态的频散方程,可以得到波数 k 与频率 ω 之间的关系表达式,由此可以推导出载流管道中液体流动时超声导波纵向模态传播的相速度频散曲线。

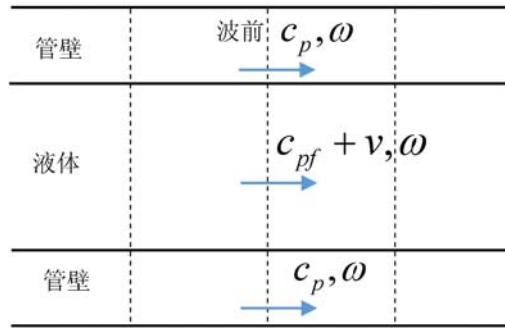


图2 超声导波在载流管道中的传播示意图

Fig. 2 Schematic of propagation of ultrasonic guided waves in a fluid-filled pipe

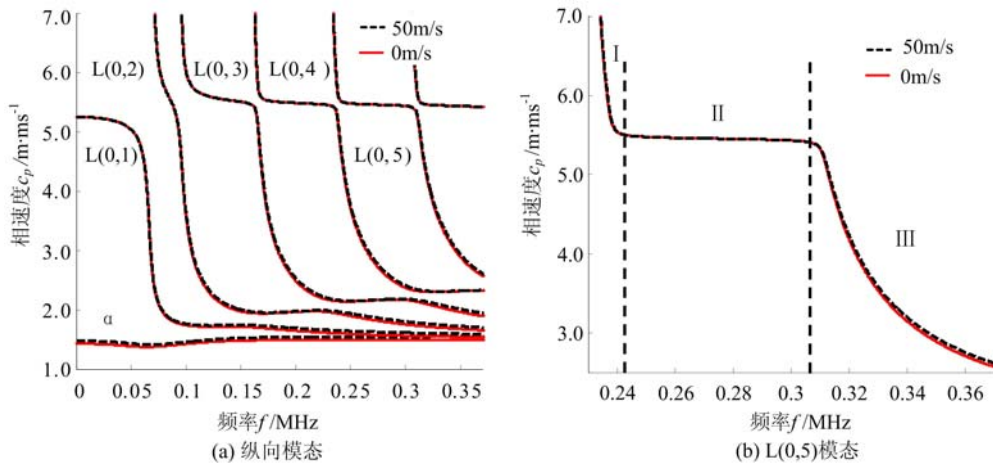


图3 不同流速充水管道内超声导波纵向模态相速度频散曲线

(a) 纵向模态, (b) L(0,5)模态

Fig. 3 Phase velocity dispersion curves of longitudinal modes in water-filled pipe with different speeds

(a) Longitudinal modes, (b) L(0,5) mode

1.2 频散曲线的数值计算与分析

图3为根据式(7)计算的不同流速充水管道内超声导波纵向模态相速度频散曲线,实线表示顺流0m/s,虚线表示顺流50m/s,图3(a)为纵向模态,图3(b)为L(0,5)模态相速度的局部放大图。钢管内径10.67mm,壁厚2.52mm,钢的密度 7932kg/m^3 ,纵波波速 5.96m/ms ,横波波速 3.26m/ms ;水的密度 1000kg/m^3 ,纵波波速 1.5m/s 。从图3中可以看出,在管道内液体流速变化时管道中纵向模态传播的相速度随之变化,而且在不同的频率下,相速度随流速的变化程度不同。

相速度与群速度之间的关系非线性。根据相速度 c_p 与频率 ω 近似推导群速度 c_g :

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \approx \frac{\omega_{i+1} - \omega_i}{k_{i+1} - k_i} = \frac{c_{pi} c_{pi+1} (\omega_{i+1} - \omega_i)}{c_{pi} \omega_{i+1} - c_{pi+1} \omega_i} \quad (8)$$

式(8)计算群速度的准确度直接受到相速度频散曲线计算结果的影响,因此将相速度 c_p 转换为角频率 ω 和波数 k 的关系,采用式(9)计算斜率 $\partial\omega/\partial k$,即可较为准确地计算载流管道群速度频散曲线。

$$c_g = \frac{\partial\omega}{\partial k} = \frac{(\omega_{i+1} - \omega_i) + (\omega_i - \omega_{i-1})}{(k_{i+1} - k_i) + (k_i - k_{i-1})} \quad (9)$$

式中, c_{pi} 、 ω_i 和 k_i 分别对应相速度序列中第 i 个相速度值及其对应的角频率和波数。在数值计算中, $\partial\omega$ 和 ∂k 都无法取到极小值,为避免出现大的误差,采用多个相邻 ω 插值和相邻 k 的插值计算斜率 $\partial\omega/\partial k$ 。图 4 即为根据式(9)计算的不同流速充水管道内超声导波纵向模态群速度频散曲线,实线表示顺流 0m/s,虚线表示顺流 50m/s,图 4(a)为纵向模态,图 4(b)为 L(0,5) 模态放大图。可以看到,随着管道内液体流速的增大,除了 α 模态的群速度会有明显增加,管道内纵向模态群速度曲线存在整体偏移现象,而且在高频 III 部分模态的偏移量更为明显。

充水管道内纵向模态类似于钢管和水柱体中各纵向模态的“混合体”,即在低频 I 部分和高频 III 部分,纵向模态在水中的轴向位移大于管道中的轴向位移,该阶段纵向模态主要在水中传播,而在 II 部分纵向模态主要在管道中传播^[7]。在研究管道水的流速对纵向模态传播特性的影响时,选择对于水流速度变化敏感的频率尤为重要。然而在 I 和 III 部分导波传播频散现象严重,不利于信号后期处理,因此选取 II 和 III 之间的过渡段作为研究重点,频率范围约为 300~310kHz,模态为 L(0,5),可以获取液体信息,又可尽量避免信号频散。

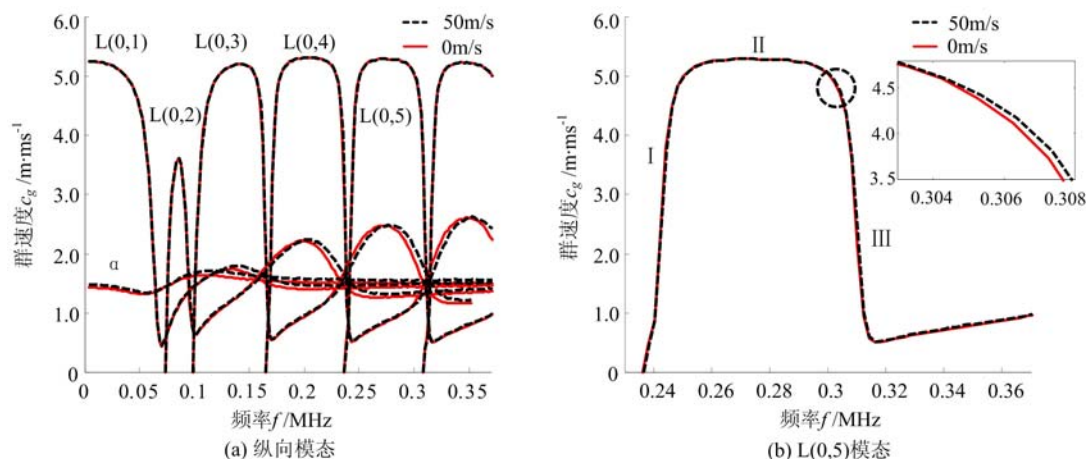


图 4 不同流速充水管道内超声导波纵向模态群速度频散曲线

(a) 纵向模态, (b) L(0,5) 模态

Fig. 4 Group velocity dispersion curves of longitudinal modes in water-filled pipe with different speeds

(a) Longitudinal modes, (b) L(0,5) mode

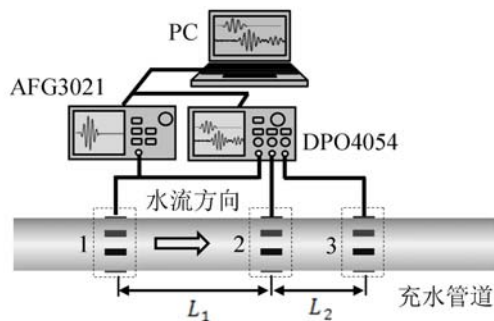


图5 实验装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of experimental apparatus

2 实验研究

2.1 实验平台搭建

研究管道内液体流速对超声导波传播特性影响的实验在小口径热能表检定台上完成。实验台不仅可以调节管道内液体的流速,还可以控制液体的温度和压力。实验时,水流由水箱经过阀门进入实验管段,流经标准电磁流量计,最后返回至水箱,通过稳压管保证水流的稳定压力。

实验装置示意图如图 5 所示。整套实验装置由计算机、DPO4054 示波器、AFG3021B 函数发生器、无缝钢管和环形压电阵列等组成。实验管道为长 1800mm、内径 10.67mm、管厚 2.52mm 的无缝钢管。三个环形压电阵列分别粘贴于管壁上,环形压电阵列之间的中心距离分别为 $L_1 = 140\text{mm}$ 、 $L_2 = 84\text{mm}$ 。

其中压电环 1 为激励端,压电环 2 与压电环 3 均为接收端,水流由压电环 1 流向压电环 2。每个环形阵列由 8 片 $12\text{mm} \times 3\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 的压电陶瓷片组成,周向均布在管壁上,并通过 502 胶水直接粘贴在管壁上,并联连接。周向均布的压电陶瓷片可以有效地抑制非轴对称模态,产生沿管道轴向方向传播的轴对称纵向模态。

2.2 纵向模态群速度计算

实验采用相关函数法计算信号时间延迟。将激励信号以 Δt 为时间增量沿时间轴进行平移,并将平移后的信号与接收信号做互相关运算,从而获得激励信号与接收信号随 Δt 变化的相关函数。在相关系数最大时,激励信号的平移量即为激励信号与接收信号之间的时间延迟。相关函数法计算时间延迟具有较强的抗噪音干扰性而且计算精度高,得到了广泛的应用^[11,12]。管道液体静止时,利用函数发生器激励中心频率 305kHz 的 5 周期正弦信号,并由接收端接收储存。图 6(a)所示为激励信号与接收信号归一化处理后的波形,图 6(b)为将两信号做相关处理后的波形,可以直接由图 6(b)读取超声导波在激励端与接收端的传播时间。

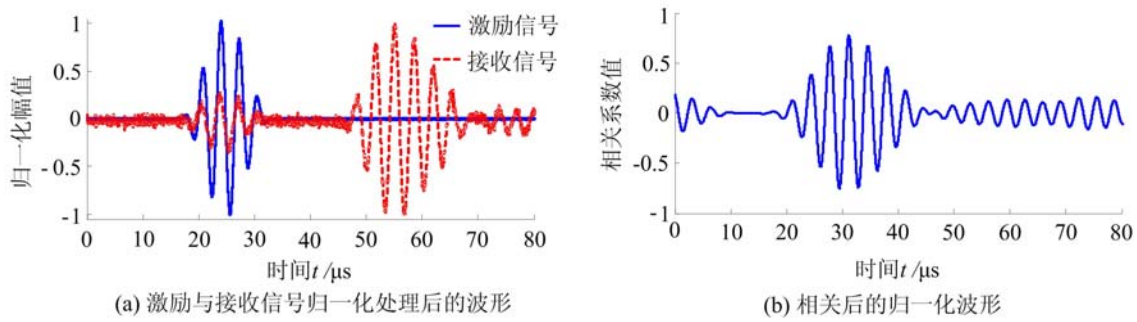


图 6 激励信号与接收信号的相关

Fig. 6 Correlation of excitation signal and reception signal

采用相关函数法计算压电环 2 接收信号的传播时间为 t_1 ,压电环 3 接收信号的传播时间为 t_2 ,导波在管道中传播速度为 v ,则

$$t_1 = \frac{L_1}{v}, \quad t_2 = \frac{L_1 + L_2}{v} \quad (9)$$

式中,传播时间 t_1 和 t_2 不仅包括导波在液体中的传播时间,还包括由于电缆长度、耦合层厚度、不锈钢管壁厚、压电片尺寸等所引起的声延时,对实验结果带来一定误差,因此,采用双环接收信号的时间差可以更加准确地计算纵向模态在充液管道的传播时间,即在压电阵列 2 与压电阵列 3 之间的传播时间差 Δt :

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{L_2}{v} \quad (10)$$

2.3 实验结果与分析

激励信号中心频率的选取是本次实验的重点,激励信号不仅要避免对管道内液体流速敏感,还应避免信号的频散效应,以保证准确提取包含液体流速信息的接收信号。结合载液管道群速度频散曲线分析结果,选取对液体流速变化较为敏感的 $L(0,5)$ 模态,激励中心频率为 305kHz 的 5 周期正弦信号。实验中管道内液体温度为 22°C ,液体流量分别设定 0.508m/s、1.525m/s、2.540m/s、3.560m/s 和 4.580m/s。各流速下超声导波传播时间 Δt 随流速的变化曲线如图 7 所示。可以看出, $L(0,5)$ 模态在管道内的传播时间随流速的增大而减小,拟合直线斜率为 $-0.0022\mu\text{s}/(\text{m/s})$,在该激励频率下 $L(0,5)$ 模态在管道内理论传播时间与流速变化曲线的斜率为 $-0.0028\mu\text{s}/(\text{m/s})$ 。实验结果与理论变化趋势相同且误差相对较小,即在特定激励频率下,超声导波的传播速度受水流速度的影响,且传播时间随水流速度的增大而下降。

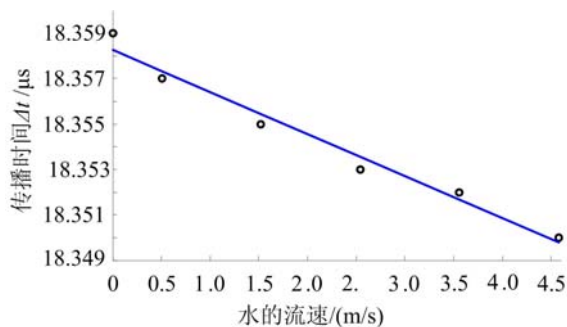


图 7 激励频率 305kHz, 载流管道内 L(0,5) 模态传播时间随水的流速变化关系

Fig. 7 The relationship between the propagation time of L(0,5) mode in a water-filled pipe with water velocity at the excitation frequency of 305kHz

3 结论

理论分析与实验验证了管道内非粘性液体(如水等)的流速对于导波纵向模态传播特性的影响。首先从理论上推导了载流管道中超声导波纵向模态的频散方程,可以看出随着管道内液体流速的增大,在特定频率下管道内纵向模态的传播速度也随着变化,并且在管道内液体流速一定时超声导波在管道内传播速度的变化受激励频率的影响。选取对管道内液体流速较为敏感的 305kHz 的 L(0,5) 模态用于管道中水的流速测量。研究表明,该模态传播时间随流速的增大而减小,拟合直线斜率为 $-0.0022\mu\text{s}/(\text{m/s})$,与理论值 $-0.0028\mu\text{s}/(\text{m/s})$ 相比较为吻合。本文提供了一种载流管道流量在线测量新方法,为超声导波流量计的研制打下了理论基础。

受限于实验设备,仅对钢管内低流速水流对超声导波传播影响进行了实验分析,后续将会对不同材质和不同管径下,更大范围内的水流速度对超声导波传播的影响,以及测量的稳定性展开进一步研究。同时,管中液体流速对超声导波传播速度的影响较小,在进行信号采集时,信号的采样率要求也较高。

参考文献:

- [1] Gazis D C. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. Analytical foundation[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1959, 31(5):568—573.
- [2] Gazis D C. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. II. Numerical results[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1959, 31(5):573—578.
- [3] Lafleur L D, Shields F D. Low-frequency propagation modes in a liquid-filled elastic tube waveguide[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 97(3):1435—1445.
- [4] Pan H T, Koyano K, Usui Y. Experimental and numerical investigations of axisymmetric wave propagation in cylindrical pipe filled with fluid[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 113(6):3209—3214.
- [5] 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.
- [6] Kwun H, Bartels K A, Dynes C. Dispersion of longitudinal waves propagating in liquid-filled cylindrical shells[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 105(5):2601—2611.
- [7] 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 (in Chinese))
- [8] Sato H, Lebedev M, Akedo J. Theoretical investigation of guide wave flowmeter[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(7B):4521—4528.
- [9] 刘洁. 基于超声导波技术的小管径管道流量测量方法研究[D]. 北京工业大学硕士学位论文, 2011 (LIU Jie. Investigation of flow measurement of small-diameter pipe filled with fluid based on ultrasonic guided wave technique[D]. Masteral Dissertation of Beijing University of Technology, 2011 (in Chinese))

- [10] Li X, Cao L. Excitation condition analysis of guided wave on PFA tubes for ultrasonic flow meter[J]. Ultrasonics, 2016, 72:134—142.
- [11] Ozaki Y, Kawaguchi T, Takeda Y, et al. High time resolution ultrasonic velocity profiler[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(2-4): 253—258.
- [12] Cepel R, Ho K C, Rinker B A, et al. Spatial correlation coefficient images for ultrasonic detection[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54(9):1841—1850.

Analysis of the influence of liquid velocity in pipeline on ultrasonic guided wave longitudinal mode propagation

LIU Zeng-hua¹, SONG Zhen-hua¹, ZHANG Yi-nong², WU Bin¹, HE Cun-fu¹

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. The Measurement Test Research Institute of Beijing, Beijing 100029, China)

Abstract: In this paper, a group velocity dispersion equation of ultrasonic guided wave longitudinal mode in liquid filled pipeline is established. The influence of mode and excitation frequency on propagation of ultrasonic guided wave in current carrying pipe was studied. Based on numerical simulation, L (0,5) mode excited by the circular piezoelectric array in current carrying pipeline was adopted to stimulate the received frequency 305kHz. The propagation characteristics of longitudinal modes in the current carrying pipeline were experimentally investigated. Experimental results indicate that group velocity of the L (0,5) mode of 305kHz frequency in current carrying pipe exhibits approximately linear variation with the flow velocity of liquid. Experimental results are in good agreement with theoretical analysis. This conclusion may provide a new method for on-line measurement of current carrying pipe flow, and lay a theoretical foundation for development of ultrasonic guided wave flowmeter.

Keywords: longitudinal mode; current carrying pipeline; dispersion curve; propagation time; flow measurement