

# 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\*

刘增华 何存富 杨士明 王秀彦 吴 斌

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100022)

**摘要:** 从理论上得到了充非粘性液体管道中纵向超声导波的频散方程。分析了纵向模态在充水钢管和带刚性边界的水圆柱体中传播特性。除  $\alpha$  模态, 充水钢管中的其他模态均是钢管和带刚性边界的水圆柱体中各模态相互耦合的结果。对于充水钢管中同一模态, 在不同频率范围, 传播特性差别也较大。在充水和未充水的钢管中进行了激励和接收纵向模态的试验研究。结果表明, 在充水钢管中具有模态分支、群速度降低等传播特性。当充水钢管中纵向模态的频带处于钢管中未受干扰的  $L(0, 2)$  模态分支部分时, 能长距离传播, 由于频散较小, 在传播距离较长时, 波形和幅度不会发生明显变化, 适合于长距离充水管道的缺陷检测。

**关键词:** 充液管道 液体圆柱体 纵向模态 模态分支 频散

**中图分类号:** TB559 O348.8

## 0 前言

管道作为五大运输工具之一, 在运送液体、气体、浆液等方面具有特殊的优势。在石油、化工、热电、供水及供热等厂矿中, 许多管网用来输送水等液体介质。然而由于管道老化、腐蚀而产生液体泄漏, 除了影响正常的生产外, 造成资源浪费, 经济损失, 甚至还会给人们的生命财产安全造成巨大损失<sup>[1-2]</sup>。然而, 常规无损检测方法如超声、涡流和磁粉等无法对在役长距离充液管道进行缺陷检测。一些能实现长距离在线检测的检测方法如压力波检测漏法<sup>[3]</sup>只能对已出现泄漏的管道进行缺陷检测与定位, 而无法检测尚未出现泄漏的非穿透缺陷。超声导波检测方法是一种新型的无损检测方法。该方法适用于在役管道的长距离检测, 可以对管道上的泄漏点即穿透缺陷进行识别与定位, 同时还可以检测影响管道使用寿命的非穿透缺陷。CHEN 等<sup>[4]</sup>和 ELVIRA-SEGURA<sup>[5]</sup>分别对地埋充液管道和充粘液管道中的超声导波传播特性进行了理论分析。KWUN 等<sup>[6]</sup>通过试验对充水管道中纵向模态的传播特性进行了研究。SINHA 和 PLONA 等<sup>[7]</sup>从理论上研究了圆柱壳内或外有无流体时等五种情况下超声导波的传播特性, 通过试验得到了不同模态的慢度并与理论结果进行了对比。但没有通过频率控制激励单一的纵向模态和分析激励频率的控制对在充

液管道检测中模态选取的重要性。

对超声导波纵向模态在充非粘性液体管道中的传播特性进行了理论分析, 得到了充液管道中频散方程。通过试验在充水和未充水的钢管中激励纵向模态, 并与理论分析结果进行了对比和讨论。

## 1 充液管道中纵向模态的理论分析与数值计算

图1为充液管道模型, 其中管中的液体为非粘性液体。坐标轴  $z$  轴为圆柱壳中心线,  $r_1$  和  $r_2$  分别表示管道内外半径。下面分别分析管道和液体圆柱体中的波动方程, 并对得到的波动方程进行数值计算与分析。

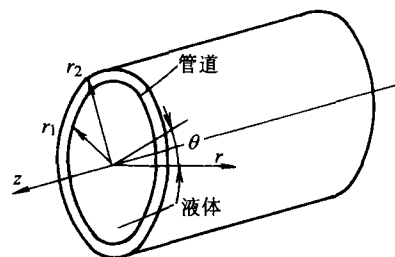


图1 充液管道示意图

### 1.1 管道中波的传播方程

当波在圆柱壳结构中传播时, 满足 Navier 位移运动方程, 即

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

式中  $\mu, \lambda$  ——材料的 Lamé 常数

$\rho$  ——材料的密度

$t$  ——时间

\* 国家自然科学基金(10272007, 10372009)、北京市自然科学基金(3011001)和北京市教委科技发展计划资助项目。20050107 收到初稿, 20050403 收到修改稿

$u$  ——位移场

将位移场  $u$  分解为标量势  $\phi$  和矢量势  $H$ , 并且

$\nabla \cdot H = 0$ 。则

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

当只考虑纵向轴对称模态时, 则矢量势  $H$  的径向分量和轴向分量均为 0, 只保留周向分量  $H_\theta$ , 且该分量为  $r, z$  和  $t$  的函数。则得

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi = \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \\ \nabla^2 H_\theta - \frac{H_\theta}{r^2} = \frac{1}{c_2^2} \frac{\partial^2 H_\theta}{\partial t^2} \end{cases} \quad (3)$$

令

$$\begin{cases} \phi = f(r) \exp[i(kz - \omega t)] \\ H_\theta = h(r) \exp[i(kz - \omega t)] \end{cases}$$

代入式(3)求解, 则可得到

$$\begin{cases} f(r) = A_1 H_0^1(\alpha r) + A_2 H_0^2(\alpha r) \\ h(r) = B_1 H_1^1(\beta r) + B_2 H_1^2(\beta r) \end{cases} \quad (4)$$

由此可得管道中的径向位移  $u_r$

$$u_r = [-\alpha A_1 H_1^1(\alpha r) - \alpha A_2 H_1^2(\alpha r) + B_1 k H_1^1(\beta r) + B_2 k H_1^2(\beta r)] \exp[i(kz - \omega t)] \quad (5)$$

利用胡克定理可得相应的应力分量

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \mu \left\{ A_1 \left[ (k^2 - \beta^2) H_0^1(\alpha r) + 2 \frac{\alpha}{r} H_1^1(\alpha r) \right] + A_2 \left[ (k^2 - \beta^2) H_0^2(\alpha r) + 2 \frac{\alpha}{r} H_1^2(\alpha r) \right] + B_1 \left[ 2k\beta H_0^1(\beta r) - 2 \frac{k}{r} H_1^1(\beta r) \right] + B_2 \left[ 2k\beta H_0^2(\beta r) - 2 \frac{k}{r} H_1^2(\beta r) \right] \right\} \times \exp[i(kz - \omega t)] \\ \sigma_{rz} = \mu \left\{ -2k\alpha A_1 H_1^1(\alpha r) - 2k\alpha A_2 H_1^2(\alpha r) + B_1 \left[ (k^2 - \beta^2) H_1^1(\beta r) \right] + B_2 \left[ (k^2 - \beta^2) H_1^2(\beta r) \right] \right\} \exp[i(kz - \omega t)] \end{cases} \quad (6)$$

式中  $A_1, A_2, B_1, B_2$  ——待定系数

$$\alpha^2 = \frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2$$

$$\beta^2 = \frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2$$

$c_1, c_2$  ——介质的纵波和横波波速

$H$  ——Hankel 函数

$\omega$  ——波的圆频率

$k$  ——波数

## 1.2 管内液体中波的传播方程

当波在非粘性液体圆柱体中传播时, 仍满足式

(1)。不同的是, 位移场  $u^f$  只能用标量势  $\phi^f$  表示, 即  $u^f = \nabla \phi^f$ 。由此得

$$\phi^f = C J_0(\alpha^f r) \exp[i(kz - \omega t)]$$

进一步求解可得

$$\begin{cases} u_r^f = -C \alpha^f J_1(\alpha^f r) \exp[i(kz - \omega t)] \\ \sigma_{rr}^f = -C \lambda^f [(\alpha^f)^2 + k^2] J_0(\alpha^f r) \exp[i(kz - \omega t)] \end{cases} \quad (7)$$

式中  $C$  ——待定系数

$f$  ——上标, 表示液体

$$(\alpha^f)^2 = \frac{\omega^2}{(c^f)^2} - k^2$$

$c^f$  ——液体中的纵波波速

$\lambda^f$  ——液体的 Lamé 常数

$$\lambda^f = (c^f)^2 \rho^f$$

$J$  ——Bessel 函数

充液管道中液体圆柱体的边界条件可看作是刚性边界, 即液体圆柱体边界条件为<sup>[8]</sup>:

$\partial(u_r^f)/\partial r = 0$  (当  $r=r_1$  时)。由此得  $\alpha^f r_1 = J_{1m}$ , 其中  $J_{1m}$  为  $J_1(x)=0$  的根,  $m=0, 1, 2, 3, \dots$ 。

则可得该边界条件下液体圆柱体的相速度

$$c_p^f = \frac{c^f}{\sqrt{1 - \left( \frac{J_{1m} c^f}{\omega r_1} \right)^2}} \quad (8)$$

## 1.3 充液管道中纵向模态的频散方程

对于充液管道来说, 在管道的外表面( $r=r_2$ ), 其应力分量  $\sigma_{rz}$  和  $\sigma_{rr}$  均为 0。即

$$(\sigma_{rr})_{r=r_2} = 0 \quad (\sigma_{rz})_{r=r_2} = 0 \quad (9a)$$

对于管道内表面即液体与管道的交界面( $r=r_1$ )来说, 径向位移  $u_r$  和应力分量  $\sigma_{rr}$  是连续的。并且由于液体为非粘性, 不能承受剪力, 故液体与管道在交界面处的应力分量  $\sigma_{rz}$  均为 0。即

$$\begin{cases} (u_r)_p = (u_r)_f \\ (\sigma_{rr})_p = (\sigma_{rr})_f \\ (\sigma_{rz})_p = (\sigma_{rz})_f = 0 \end{cases} \quad (9b)$$

式中  $p$  ——上标, 表示管道

将式(5)、(6)和(7)代入式(9), 并同时代入各层相应的常量。由此得到一组特征方程, 方程的矩阵形式为

$$DY = 0 \quad (10)$$

式中  $Y = [A_1 \ A_2 \ B_1 \ B_2 \ C]^T$

$D$  —— $5 \times 5$  系数矩阵

为使式(10)有非零解, 其系数行列式必须为零,

即

$$D = 0 \quad (11)$$

式(11)即为充液管道中超声导波的频散方程, 即波数  $k$  和频率  $f$  的关系表达式, 该方程只能数值求解。

#### 1.4 频散曲线的数值计算与分析

由式(8)和(11)可得带刚性边界的液体圆柱体和充液管道中超声导波的相速度频散曲线。图 2a 给出了频带为 0~0.4 MHz 时, 钢管和带刚性边界的水圆柱体的相速度频散曲线。图 2a 中的虚线和实线分别表示钢管和水圆柱体的纵向模式。图 2b 给出了充水钢管的相速度频散曲线。图 3 给出了未充水和充水钢管的群速度频散曲线。图 4 给出了在充水钢管中  $L(0, 5)$  模态在典型频率下的轴向位移分布。其中, 钢管外直径 32 mm, 壁厚 3 mm, 水圆柱体的直径与钢管内径相同。其中, 钢的密度  $7\,932\text{ kg/m}^3$ , 纵波波速  $5\,960\text{ m/s}$ , 横波波速  $3\,260\text{ m/s}$ , 水的密度  $1\,000\text{ kg/m}^3$ , 纵波波速  $1\,500\text{ m/s}$ 。

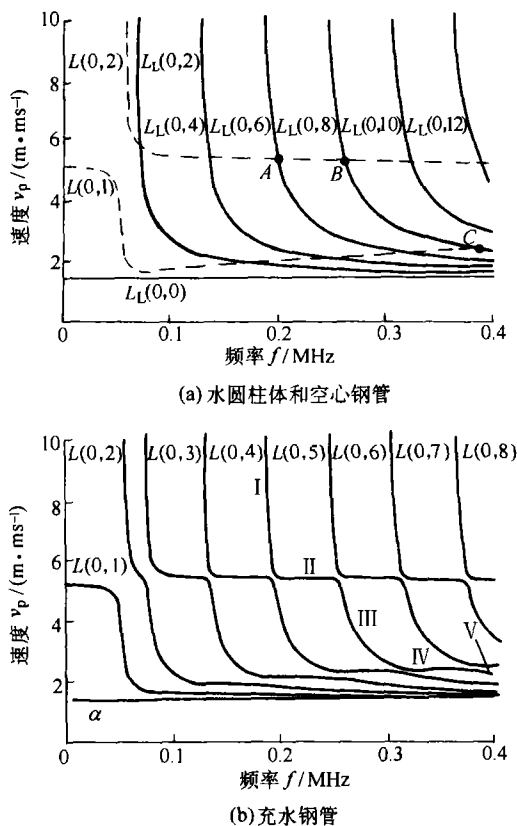


图 2 不同结构的相速度频散曲线

从图 2~4 中可以看出, 在带刚性边界的水圆柱体、未充水钢管和充水钢管中传播的纵向模式具有以下的特点。

(1) 在频带为 0~0.4 MHz 时, 钢管中只存在 2 个纵向模式:  $L(0, 1)$  模式和  $L(0, 2)$  模式。而水圆柱体中则存在 7 个纵向模式, 即  $L_1(0, 2N)$  ( $N=0\sim6$ )。其

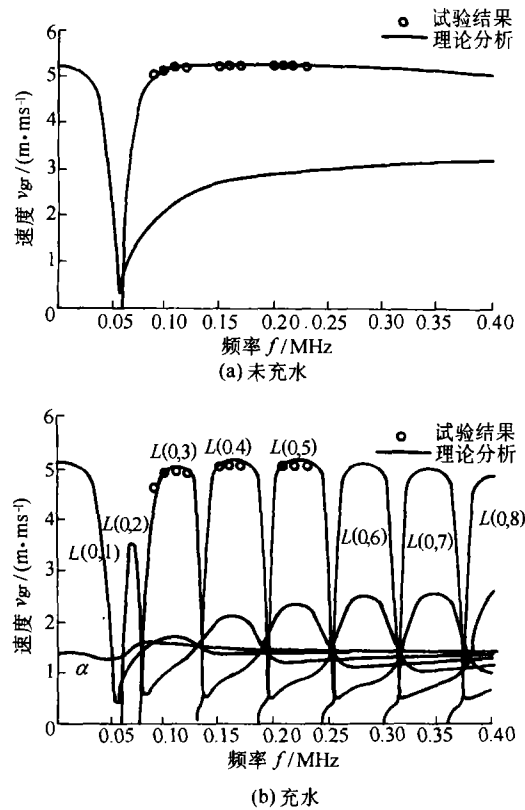


图 3 管道中纵向模式的群速度频散曲线

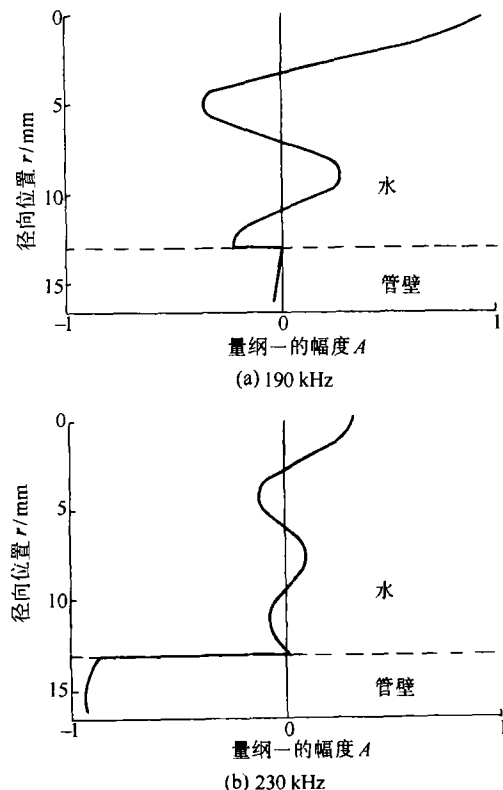


图 4 在不同频率下, 充水管道中  $L(0, 5)$  模态量纲一的轴向位移分布

中  $N$  表示沿水圆柱体直径方向半波长的个数, 下标“L”表示液体。最低阶模式  $L_L(0, 0)$  不频散, 其相速度和群速度等于水的纵波波速。  $L_L(0, 2N)$  是频散的,

截止频率  $f_N = c^f J_{1N}/2\pi r^{[8]}$ 。其中,  $L_L(0, 2)$ 和  $L_L(0, 4)$  模式的截止频率分别为 70.13 kHz 和 128.90 kHz, 如图 2a 所示。

(2) 水圆柱体中的最低阶模式  $L_L(0, 0)$ 与钢管的纵向模式没有交点, 而其他纵向模式均和钢管中的纵向模式相交。当水圆柱体和钢管中两个纵向模式的相速度在某一频率相交时, 则会产生模式耦合现象<sup>[9]</sup>。从图 2b 和 3b 中可以明显地看出模式耦合现象。除了  $L_L(0, 0)$ 模式, 钢管和水圆柱体的所有模式均在充水钢管的纵向模式中不同程度地存在。充水钢管中的  $L(0, 5)$ 模式, 其截止频率 187.78 kHz, 接近于水圆柱体中  $L_L(0, 6)$ 模式截止频率 186.83 kHz。该模式可分为 5 部分, 如图 2b 所示。在第 I 部分即低频段时, 类似于水圆柱体中的  $L_L(0, 6)$ 模式。随着频率的增大, 该模式越过 A 点到达第 II 部分时, 则主要类似于钢管中的  $L(0, 2)$ 模式。该模式越过 B 点到达第 III 部分时, 则类似于水圆柱体中的  $L_L(0, 8)$ 模式。当频率逐渐增大, 该模式接近于钢管中的  $L(0, 1)$ 模式, 即为第 IV 部分。当经过 C 点后, 则该模式又以类似于  $L_L(0, 10)$ 模式的形式传播。由此可见, 在充水钢管中除了  $\alpha$  模式, 其他所有纵向模式类似于水圆柱体和钢管中各纵向模式的“混合体”, 即在不同的频率范围, 传播特性差别较大。由图 4 可知, 当频率为 190 kHz 的  $L(0, 5)$ 模式(处在第 I 部分), 该模式在水中的轴向位移远大于在钢管上的轴向位移, 说明该模式主要水中传播, 类似于水圆柱体中的  $L_L(0, 6)$ 模式。而当频率为 230 kHz 时(处在第 II 部分), 该模式在钢管中的轴向位移远大于在水中的轴向位移, 说明该模式的能量主要在钢管中传播, 类似于管道中的  $L(0, 2)$ 模式。

(3) 从图 2b 中可以看出, 钢管中单一的  $L(0, 2)$ 模式在充水钢管中被“打断”, 分属于不同的纵向模式, 即模式分支现象。尽管该模式被“打断”, 但这些未受干扰的部分仍以类似钢管中  $L(0, 2)$ 模式的形式传播, 能量主要在钢管中传播, 并且轴向位移较大。从图 2b 和 3b 中可以看出, 未被干扰的  $L(0, 2)$ 模式分支部分频散较小, 对钢管中的水不敏感, 衰减较小, 并且  $L(0, 2)$ 模式的轴向位移大于径向位移<sup>[10]</sup>。因此, 这些分支部分的纵向模式适合长距离充水钢管中的缺陷检测。钢管中的  $L(0, 1)$ 模式亦有类似分支现象, 但该模式频散较大, 在钢管中的径向位移较大, 不适于长距离管道检测。

(4) 通过数值计算可知, 与钢管中的  $L(0, 2)$ 模式相比, 充水钢管中未受干扰的  $L(0, 2)$ 模式分支部分的群速度具有不同程度的下降, 如表所示。

(5) 在充水钢管的频散曲线中, 出现了一个在

水圆柱体和钢管中均没有的纵向轴对称模式, 即  $\alpha$  模式。ARISTÉGUI 等<sup>[11]</sup>通过测定波速验证了该模式的存在。认为该模式在高频时在管壁上主要为弯曲运动。并且在水中的径向位移和轴向位移随着距管内壁的距离呈指数衰减。该模式的运动方式类似于 Scholte 波。由于试验装置的限制, 没有对该模式做进一步研究。

表  $L(0, 2)$ 模式的群速度

激励频率 $f/\text{Hz}$	110		160	
	未充水	充水	未充水	充水
理论值 $v/(\text{m} \cdot \text{ms}^{-1})$	5.280	5.177	5.378	5.296
试验值 $v/(\text{m} \cdot \text{ms}^{-1})$	5.303	5.086	5.320	5.237

## 2 试验研究

### 2.1 试验装置

整套试验装置如图 5 所示。由任意波形发生器(HP33120A)、功率放大器(Ultra2020)、数字示波器(TDS3032B)、钢管、计算机和探头(一组 PZT5 压电陶瓷片)所组成。激励信号为单音频信号, 由任意波形发生器产生; 经功率放大器进行功率放大; 通过转换开关激励探头, 在管道中产生纵向模式的超声导波; 激励信号后, 经过转换开关, 探头又可接收信号, 在数字示波器显示, 并通过以太网端口存储到计算机。在本试验中, 被测试的管道为无缝不锈钢管。管道长 7 120 mm, 管道的其他几何尺寸和性能参数与前面数值计算相同。在充水前, 用 502 胶将直径与管道外径相当的有机玻璃圆片粘在管道底部。

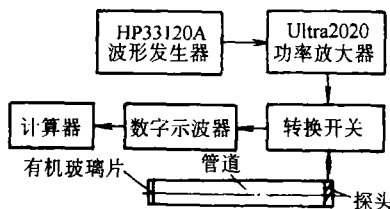


图 5 试验装置示意图

### 2.2 探头选取

为了在管道中产生沿轴向传播的轴对称纵向模式, 采用的探头为长度伸缩型 PZT5 压电陶瓷片。16 片  $20 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  的压电陶瓷片在管道端部周向均布, 采用 502 胶水直接粘贴在管道表面。一定数量的压电陶瓷片管道周向均布, 可以有效地抑制非轴对称模式, 激励轴对称纵向模式。

### 2.3 激励信号

为在管道激励出特定频率的纵向模式, 选取的是单音频信号, 即经 Hanning 窗调制的正弦信号, 10 个震荡周期。该信号由任意波形发生器输出到功

率放大器, 经功率放大后, 峰值可达 150 V, 激励压电陶瓷片。频率为 180 kHz 单音频信号的时域波形和频域图如图 6 所示。

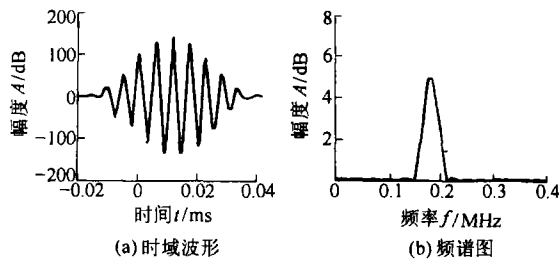


图 6 激励信号图

## 2.4 试验结果与分析

采用图 5 所示的试验装置, 在未充水和充水钢管中分别进行了激励与接收纵向模式试验。图 7 和图 8 给出了激励频率分别为 70 kHz 和 110 kHz 时, 在未充水钢管和充水钢管中接收到的多次端面反射的时域波形图。对于每一个时域信号分别给出短时傅里叶变换结果图。

时频分析方法是在时频空间对信号的描述, 表示信号在时频空间的能量分布密度。短时傅里叶变换是时频分析方法中的一种, 即采用该方法对时域信号进行时频分析。超声导波的群速度是不同模式在结构中能量传播的速度。超声导波的群速度频散曲线是在速度—频率空间上描述超声导波不同模式的能量传播特性。当超声导波的传播距离一定, 则传播时间越长, 群速度越小。因此, 结构中传播的

超声导波信号的时频分布和该结构中超声导波的群速度频散曲线具有一定的对应关系。信号的时频分析通过与群速度频散曲线对比, 可以判定信号中存在的不同导波模式。

从图 7a 的时域波形, 无法判断信号中所存在的模式, 甚至无法确定模式在管道端面反射回波的次数。但从信号的时频分析结果可以很清晰地辨别出信号中的模式、模式的频率范围、模式能量的大小和模式在管道中来回反射的次数。在图 7a 的时频分析中可以看出, 在时域信号中主要有  $L(0, 2)$  模式, 模式存在的频率范围大约在 60~250 kHz。并且主要能量分布在 70~100 kHz, 该模式在管道中来回传播共 3 次。而从图 7b 的时频分析结果可以看出, 当钢管充水后, 模式发生很大变化, 由未充水钢管中的单一  $L(0, 2)$  模式分解成 4 个不同的纵向模式:  $L(0, 2)$ 、 $L(0, 3)$ 、 $L(0, 4)$  和  $L(0, 5)$  模式, 即前面理论分析中的模式分支现象。通过与理论群速度频散曲线对比为吻合。并且也有三次端面回波。

从未充水钢管的频散曲线可以看出, 当频率为 70 kHz 时,  $L(0, 2)$  模式频散严重。对于充水钢管, 在该频率附近的各纵向模式频散也较大, 很难激励出波形单一且模式频散较小的波形。并从时频分析结果可以看出, 各模式的群速度相差不大, 波形相互叠加, 从而影响对钢管中的缺陷检测。因此, 频散较大的纵向模式不适于管道的缺陷检测。

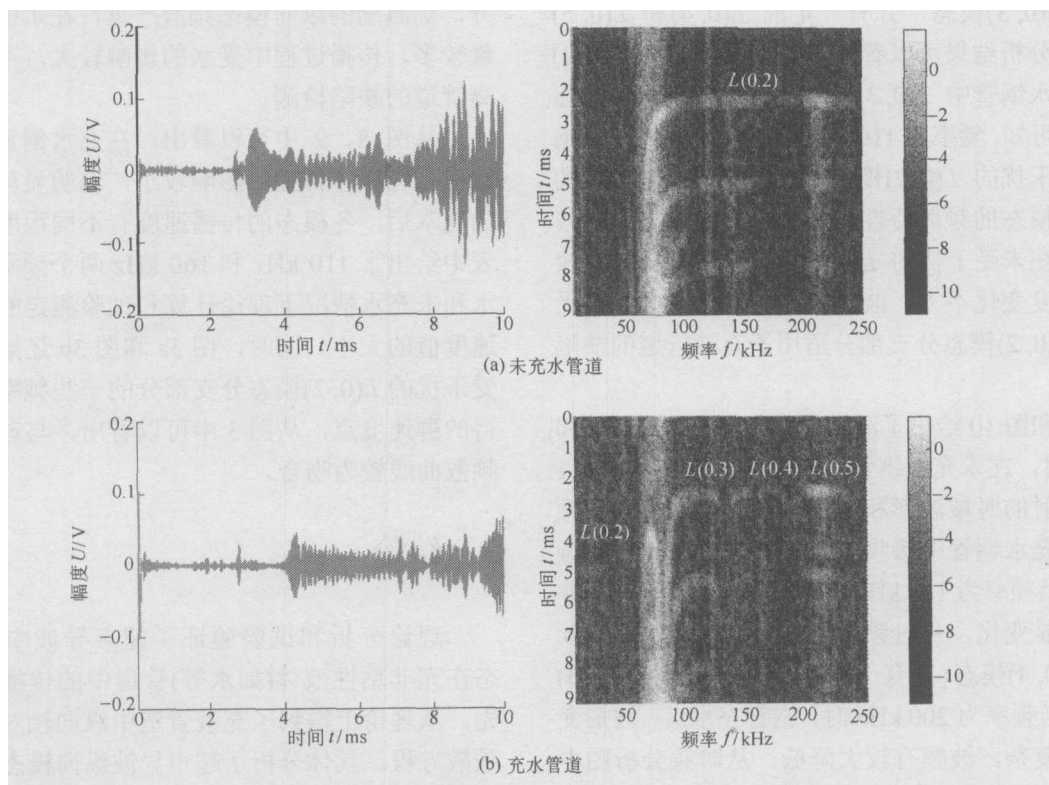


图 7 频率为 70 kHz, 在管道中接收的多次反射时域波形和时频分析结果

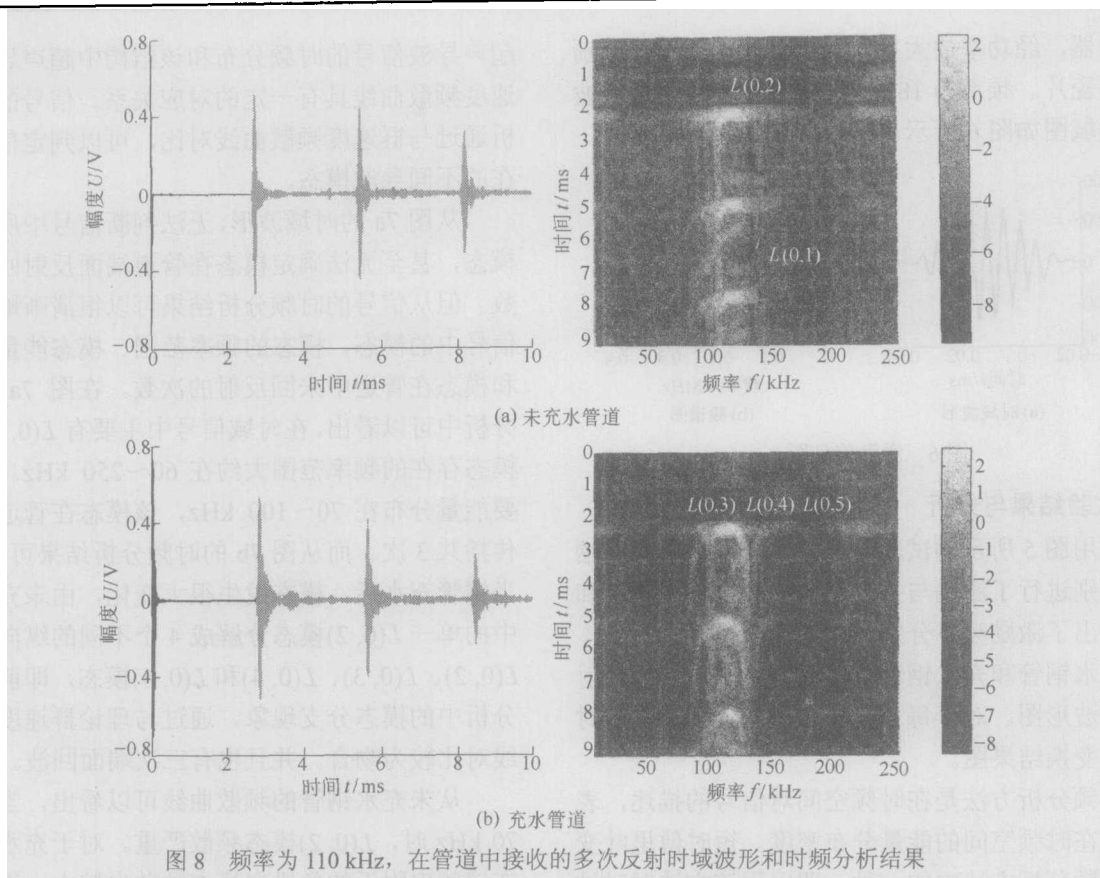


图8 频率为110 kHz,在管道中接收的多次反射时域波形和时频分析结果

和图7不同,从图8a和图8b的时域波形中可以明显地看到三次端面回波。经时频分析可以看出,在图8a未充水钢管得到的时域信号中主要存在三次 $L(0,2)$ 模态的端面回波和一次 $L(0,1)$ 模态的端面回波。而在充水钢管中,主要存在频带约为80~130 kHz的 $L(0,3)$ 模态,并有一定的 $L(0,4)$ 和 $L(0,5)$ 模态。从分析结果可以看出,未充水钢管中 $L(0,2)$ 模态和充水钢管中 $L(0,3)$ 模态的频散较小。从前面理论分析可知,频率为110 kHz的 $L(0,3)$ 模态属于钢管中未受干扰的 $L(0,2)$ 模态分支部分,钢管中水的有无对该模态的频散特性和传播特性的影响相对较小,并且在未受干扰的 $L(0,2)$ 模态分支部分频散较小,群速度变化不大,波形较为单一。因此,未受干扰的 $L(0,2)$ 模态分支部分适用于充液管道的缺陷检测。

图9和图10给出了激励频率分别为160 kHz和200 kHz时,在未充水钢管和充水钢管中接收到的1次端面反射的时域波形和时频分析结果。在两个频率下,未充水钢管中接收的波形均较单一,模态频散较小。当频率为160 kHz时,钢管充水后,波形并未发生明显变化,从时频分析图中可以看出,主要能量为 $L(0,4)$ 模态,并有一定能量的 $L(0,3)$ 和 $L(0,5)$ 模态。而当频率为200 kHz时,钢管充水后,波形变宽,也更复杂,波幅有较大降低。从时频分析图中可以看出,主要能量为 $L(0,4)$ 和 $L(0,5)$ 模态,并有一

定能量的 $L(0,3)$ 和 $L(0,6)$ 模态。其中在频率为200 kHz附近的 $L(0,4)$ 和 $L(0,5)$ 模态频散也相对严重。

由此可见,当激励的纵向模态处于未受干扰的 $L(0,2)$ 模态分支部分时,主要能量在管道中传播,受管道中水的影响较小。而当激励频率不处于该部分,则激励的纵向模态频散严重,在水中传播的能量较多,传播过程中受水的影响较大,不利于长距离管道的缺陷检测。

从图8、9中可以看出,在充水钢管中,尽管水对相应模态传播的影响较小,但明显可以看出,当充水后,各模态的传播速度有不同程度的下降。表中给出了110 kHz和160 kHz两个频率在钢管充水和未充水情况下理论计算和试验测定的各模态群速度值的大小。同时,图3a和图3b还给出了在未受干扰的 $L(0,2)$ 模态分支部分的一些频率下试验测得的群速度点,从图3中可以看出,与理论计算的频散曲线较为吻合。

### 3 结论

理论分析和试验验证了超声导波中的纵向模态在充非粘性液体(如水等)管道中的传播特性。首先,从理论上得到了充液管道中纵向轴对称模态的频散方程。具体分析了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。除 $\alpha$ 模



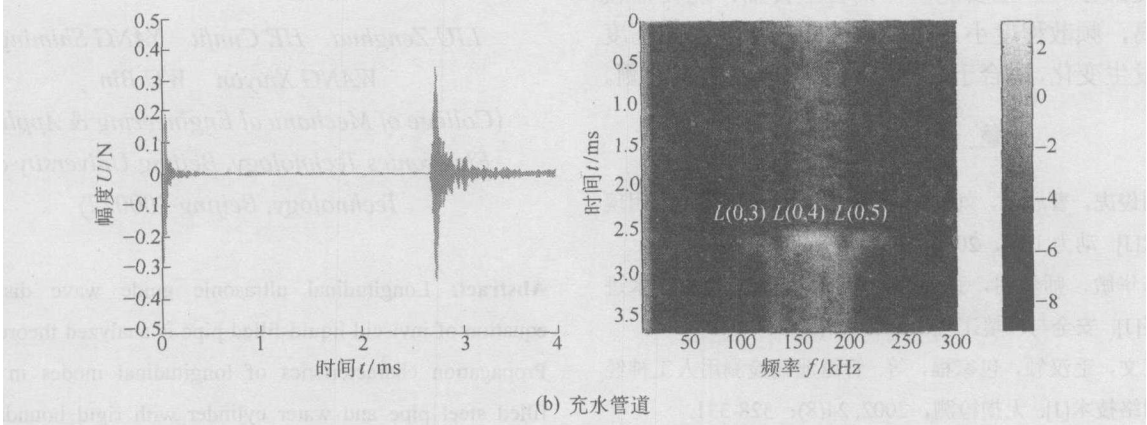
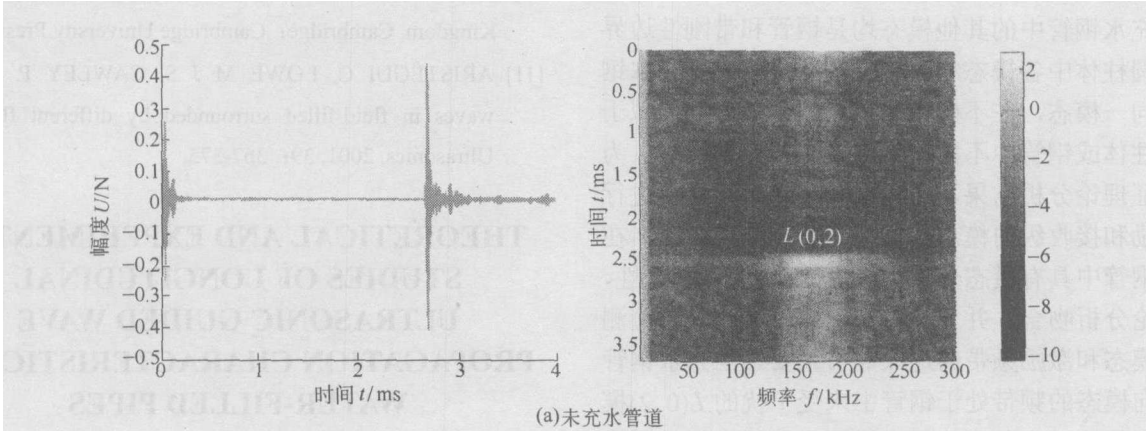


图 9 频率为 160 kHz，在管道中接收的时域波形和时频分析结果

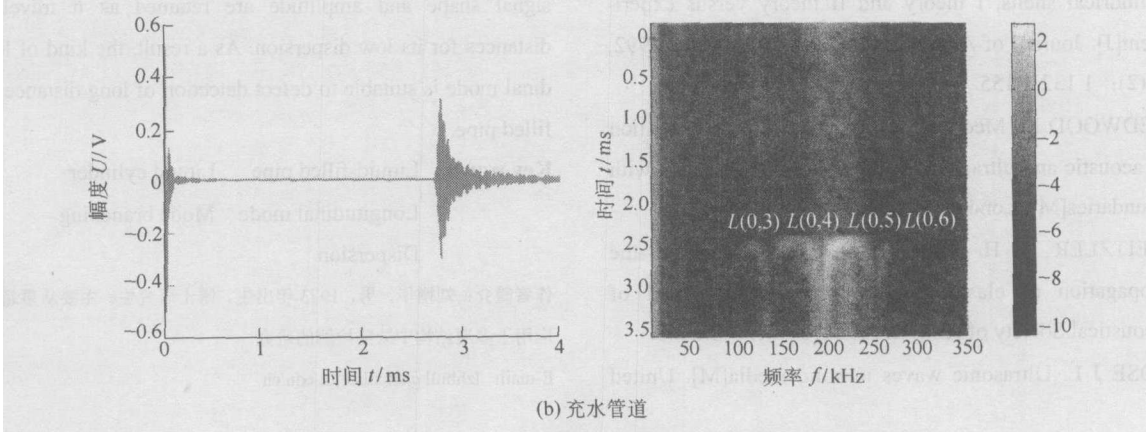
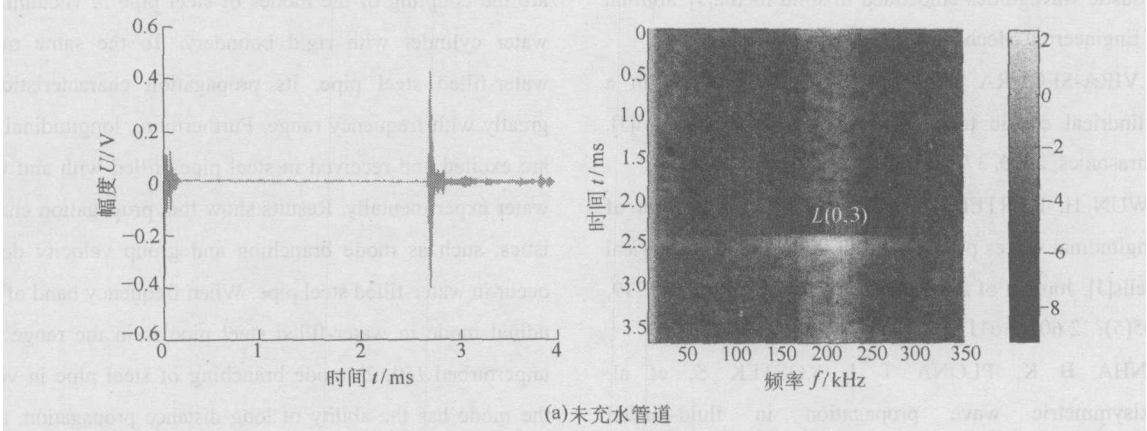


图 10 频率为 200 kHz，在管道中接收的时域波形和时频分析结果

态, 充水钢管中的其他模态均是钢管和带刚性边界的水圆柱体中各模态相互耦合的结果。对于充水钢管中同一模态, 在不同频率范围, 传播特性类似于水圆柱体或钢管中不同的纵向模态, 差别较大。为了验证理论分析结果, 在充水和未充水钢管中进行了激励和接收纵向模态的试验研究。结果表明, 在充水钢管中具有模态分支、群速度降低等传播特性, 与理论分析吻合。并且, 在充液钢管中的导波检测时, 模态和激励频带的选取非常重要。当充水钢管中纵向模态的频带处于钢管中未受干扰的  $L(0, 2)$  模态分支部分时, 主要能量在钢管中传播, 能传播较长距离, 频散程度小, 在传播长距离后波形和幅度不会发生变化, 适合于长距离充水管道的缺陷检测。

### 参 考 文 献

- [1] 周俊虎, 曹欣玉, 刘建忠, 等. 管道泄漏知识及应用现状[J]. 动力工程, 2000, 20(6): 937-950.
- [2] 陈华敏, 师学明, 张云殊, 等. 管道泄漏检测技术发展[J]. 安全与环境工程, 2003, 10(3): 58-61.
- [3] 黄文, 毛汉领, 包家福, 等. 管道泄漏检测用人工神经网络技术[J]. 无损检测, 2002, 24(8): 328-331.
- [4] CHEN H L, HE Y D. Analysis of liquid-core cylindrical acoustic waveguides embedded in solid media[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996, 122(1): 1-9.
- [5] ELVIRA-SEGURA L. Acoustic wave dispersion in a cylindrical elastic tube filled with a viscous liquid[J]. Ultrasonics, 2000, 37: 537-547.
- [6] KWUN H, BARTELS K A, DYNES C. Dispersion of longitudinal waves propagating in liquid-filled cylindrical shells[J]. Journal of Acoustical Society of America, 1999, 105(5): 2 601-2 611.
- [7] SINHA B K, PLONA T J, KOSTEK S, et al. Axisymmetric wave propagation in fluid-loaded cylindrical shells, I theory and II theory versus experiment[J]. Journal of Acoustical Society of America, 1992, 92(2): 1 132-1 155.
- [8] REDWOOD M. Mechanical waveguides: the propagation of acoustic and ultrasonic waves in fluids and solids with boundaries[M]. London: Pergamon Press, 1960.
- [9] MEITZLER A H. Mode coupling occurring in the propagation of elastic pulses in wires[J]. Journal of Acoustical Society of America, 1961, 33(4): 435-445.
- [10] ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. United Kingdom, Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [11] ARISTÉGUI C, LOWE M J S, CAWLEY P. Guided waves in fluid-filled surrounded by different fluids[J]. Ultrasonics, 2001, 39: 367-375.

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF LONGITUDINAL ULTRASONIC GUIDED WAVE PROPAGATION CHARACTERISTICS IN WATER-FILLED PIPES

LIU Zenghua HE Cunfu YANG Shiming  
WANG Xiuyan WU Bin

(College of Mechanical Engineering & Applied  
Electronics Technology, Beijing University of  
Technology, Beijing 100022)

**Abstract:** Longitudinal ultrasonic guide wave dispersion equation of inviscid liquid-filled pipe is analyzed theoretically. Propagation characteristics of longitudinal modes in water-filled steel pipe and water cylinder with rigid boundary are studied. Except  $\alpha$  mode, other modes in wall-filled steel pipe are the coupling of the modes of steel pipe in vacuum and of water cylinder with rigid boundary. To the same mode in water-filled steel pipe, its propagation characteristics vary greatly with frequency range. Furthermore, longitudinal modes are excited and received in steel pipes filled with and without water experimentally. Results show that propagation characteristics, such as mode branching and group velocity decrease, occur in water-filled steel pipe. When frequency band of longitudinal mode in water-filled steel pipe is in the range of one unperturbed  $L(0, 2)$  mode branching of steel pipe in vacuum, the mode has the ability of long distance propagation, and the signal shape and amplitude are retained as it travels long distances for its low dispersion. As a result, the kind of longitudinal mode is suitable to defect detection of long distance water-filled pipe.

**Key words:** Liquid-filled pipe    Liquid cylinder  
Longitudinal mode    Mode branching  
Dispersion

作者简介: 刘增华, 男, 1973 年出生, 博士研究生。主要从事超声导波应用于多层结构中缺陷检测的研究。

E-mail: lzhbull@emails.bjut.edu.cn