

非浸入式超声导波液位测量方法研究^{*}

徐 鸿, 郭 鹏, 田振华, 邓 博, 张凯利

(华北电力大学能源动力与机械工程学院 北京 102206)

摘 要:从 Navier 运动方程出发,求解了自由平板和覆水平板中导波的特征方程,并绘制了其频散曲线。自由平板和覆水平板频散特性对比分析后,发现了覆水平板中导波模态较自由平板多了一种 Quasi-Scholte 模态导波。通过数值计算、有限元模拟和实验研究,分别对自由平板和覆水平板中导波的传播特性和模态进行验证。在低频区, A_0 模态导波存在于自由平板中,而 Quasi-Scholte 模态导波只存在于覆水平板中。利用 Quasi-Scholte 模态和 A_0 模态导波的传播特性设计液位测量实验,采用一激一收压电传感器布置方式,频率 130 kHz 的 2.5 周期汉宁窗调制正弦波作为检测信号,结果表明,液位与导波传播时间呈线性关系,能够用于容器内液位测量。

关键词: 超声导波; A_0 模态; Quasi-Scholte 模态; 液位测量

中图分类号: TB559 TH816 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.20

Research on non-immersive water level measurement method based on ultrasonic guided waves

Xu Hong, Guo Peng, Tian Zhenhua, Deng Bo, Zhang Kaili

(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The characteristic equations of the guided waves in free steel plate and water loaded steel plate are solved based on the Navier kinetic equation; then, the dispersion curves are drawn. After comparing and analyzing the dispersion characteristics of free plate and water loaded plate, it is found that a Quasi-Scholte modal guided wave exists in water loaded steel plate, which does not exist in free steel plate. Through numerical calculation, finite element simulation and experiment, the propagation characteristics and modals of the guided waves in free plate and water loaded plate are verified respectively. In low-frequency region, A_0 modal exists in the guided waves in free plate, and Quasi-Scholte modal only exists in the guided waves in water loaded plate. Using the propagation characteristics of the A_0 modal and Quasi-Scholte modal guided waves, a water level measurement experiment was designed, which adopts pitch-catch PZT sensor deployment modal, and a 130Hz, 2.5-period Hanning window modulated sine wave signal is used as the test signal. The results show that the water level and the guided wave propagation time exhibit a linear relationship, which can be potentially used for the estimation of water level in a container.

Keywords: ultrasonic guided wave; A_0 modal; Quasi-Scholte modal; water level measurement

1 引 言

在工业生产过程中,液位往往是很重要的控制参数。对于一般储液装置内所储存液体的多少对生产过程的影响

是不可忽视的。如火力发电厂生产过程中的锅炉汽包、高压加热器、低压加热器、除氧器、凝汽器、轴封加热器、疏水箱等液位变化对电站机组的安全经济运行至关重要。因此,能高精度、高可靠实时监测水位变化的技术研究就显得尤为重要。

超声导波是一种沿着波导(平板或管道)传播的弹性波,具有低能耗、高敏感性和长距离传播的能力。目前,超声导波已被用于浸水结构完整性的无损检测,如船体、潜艇和 水下管道^[1-6]。尽管如此,当自由平板浸入水中时,超声导波在自由平板中的传播会受到水的影响,而对这部分的研究甚少。Wang Z 等人^[7]基于有限元与边界元理论对弹性壳体表面声压和质点振动速度的数值表达式进行推导,研究了弹性壳体中水下回波的传播特性;王贵恩等人^[8]利用超声波传感器对窖井中积水深度进行测量;胡宏伟等人^[9]利用水声距优化方法对浸入水中的铝-黄铜粘结件进行探伤。

本文提出了一种新型的非浸入式密闭容器液位测量方法,该方法是根据覆水平板中 Quasi-Scholte 模式导波和自由平板中 A_0 模式导波在密闭容器平板外壁面中的传播特性,得到密闭容器内液位变化情况。由于激发和接收传感器均布置在密闭容器平板壁面外表面,其与液体分别处于密闭容器平板壁面两侧,检测信号沿平板壁面传播,故本文提出的方法称之为非浸入式密闭容器液位测量方法。

2 平板中的导波

2.1 自由平板中导波的频散特性

目前,自由平板中导波的频散特性已有大量的研究成果^[10-16]。如图 1(a)所示,对于各向同性均匀介质,根据 Navier 运动方程,可以求得自由平板中 Lamb 波的特征方程为:

$$\begin{vmatrix} k_s^2 - \xi^2 & k_s^2 - \xi^2 & -2k_s\xi & 2k_s\xi \\ 2k_l\xi & -2k_l\xi & k_s^2 - \xi^2 & k_s^2 - \xi^2 \\ (k_s^2 - \xi^2)g_L & \frac{k_s^2 - \xi^2}{g_L} & -2k_s\xi g_s & \frac{2k_s\xi}{g_s} \\ 2k_l\xi g_L & \frac{-2k_l\xi}{g_L} & (k_s^2 - \xi^2)g_s & \frac{k_s^2 - \xi^2}{g_s} \end{vmatrix} = 0$$

(1)

式中: $k_L^2 = \omega^2/c_L^2 - \xi^2$, $k_s^2 = \omega^2/c_s^2 - \xi^2$, $\xi = 2\pi/\lambda$, $c_L = \sqrt{[2\mu(1-\nu)]/[\rho(1-2\nu)]}$, $c_s = \sqrt{\mu/\rho}$, $g_L = e^{ik_L d}$, $g_s = e^{ik_s d}$, $d = 2h$ 。另外, h 是自由平板厚度的一半, ω 、 ξ 和 λ 分别是角频率、波数和波长, c_L 和 c_s 分别是纵波波速和横波波速, ρ 、 μ 和 ν 分别是自由平板的密度、剪切模量和泊松比。

通过对方程求解,可得到自由平板(钢板的物性参数如表 1 所示)的频散曲线,如图 2 所示。图 2 中对称模式 S_0 和反对称模式 A_0 的起点在低频区,在低频区内, S_0 模

态传播速度快,且群速度随频率变化较小;与之相反, A_0 模式传播速度慢,且群速度随频率变化较大;图 2(c)显示自由平板的波数只有实部,虚部为 0。

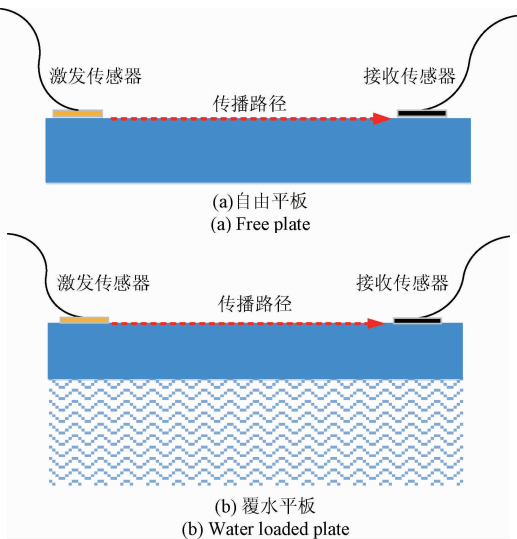
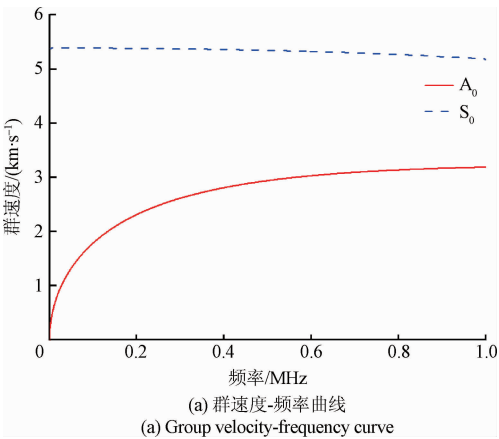


图 1 导波模态识别实验示意图
Fig. 1 Schematic diagram of guided wave modal identification experiment

表 1 物性参数
Table 1 Material properties

参数	数值
钢板密度/(kg·m ⁻³)	8 000
钢板的弹性模量/GPa	196. 5
钢板泊松比	0. 29
钢板厚度/mm	1. 2
水的密度/(kg·m ⁻³)	1 000
水中波速/(m·s ⁻¹)	1 500



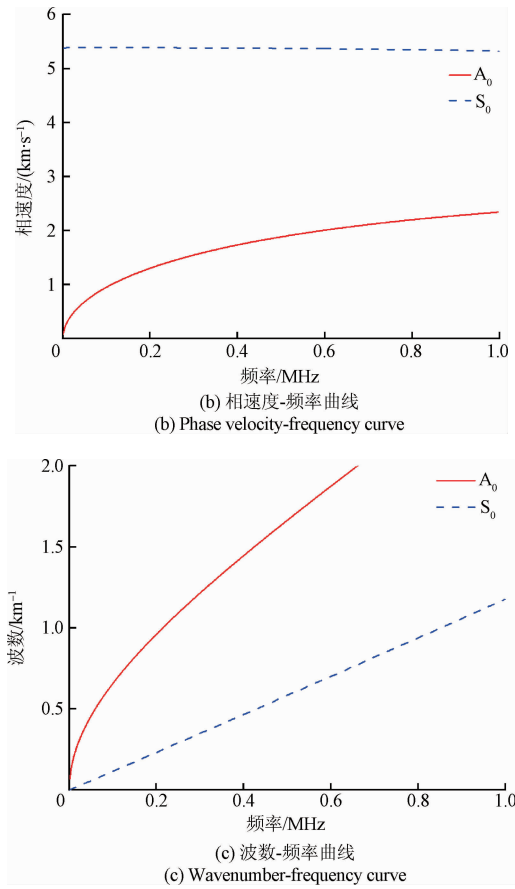


图 2 厚度 1.2 mm 钢板频散曲线
Fig. 2 Dispersion curves of a 1.2 mm thickness free steel plate

2.2 覆水平板中导波的频散特性

如图 1(b)所示,当自由平板的下表面被水覆盖,因为该表面与水接触,其边界条件与上表面不同。根据 Navier 运动方程,可以得到覆水平板的特征方程:

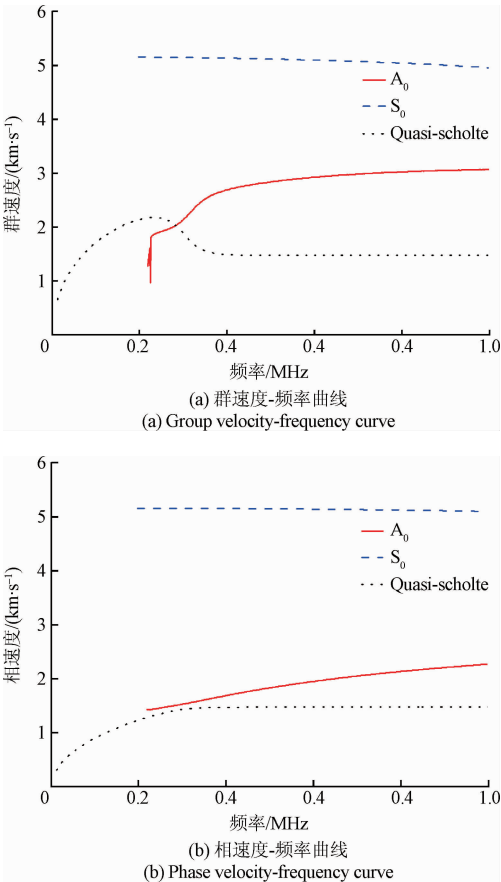
$$\begin{vmatrix} k_s^2 - \xi^2 & k_s^2 - \xi^2 & -2k_s\xi & 2k_s\xi & 0 \\ 2k_L\xi & -2k_L\xi & k_s^2 - \xi^2 & k_s^2 - \xi^2 & 0 \\ (k_s^2 - \xi^2)g_L & \frac{k_s^2 - \xi^2}{g_L} & -2k_s\xi g_s & \frac{2k_s\xi}{g_s} & \frac{\omega^2 \rho_w}{\mu} \\ 2k_L\xi g_L & \frac{-2k_L\xi}{g_L} & (k_s^2 - \xi^2)g_s & \frac{k_s^2 - \xi^2}{g_s} & 0 \\ k_L g_L & \frac{-k_L}{g_L} & -\xi g_s & \frac{-\xi}{g_s} & \gamma \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

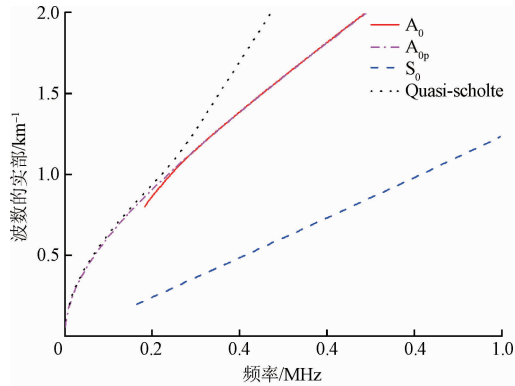
式中: $\gamma^2 = \omega^2/c_{Lw}^2 - \xi^2$, $c_{Lw} = \sqrt{\lambda_w/\rho_w}$ 。另外, c_{Lw} 是水中纵波波速, ρ_w 是水的密度, λ_w 是水的体积刚度。

由于平板中 Lamb 波的能量可以通过平板与水的交

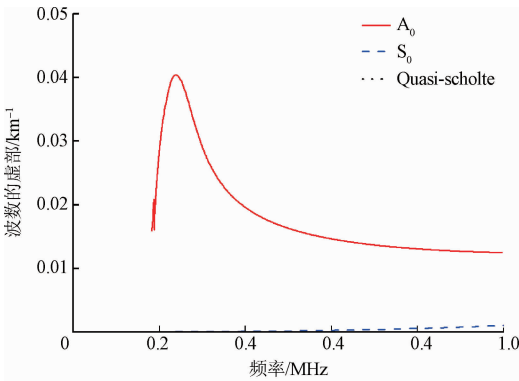
界面,以离面位移和应力耦合的方式,传播到水中,即能量泄漏,方程的波数解为复数,其中实部与导波的传播和波场相关,虚部与导波能量的泄漏和衰减相关。图 3 所示为 1.2 mm 厚钢板(下表面与水接触)中导波的频散曲线。1.2 mm 厚钢板的相关物性参数如表 1 所示。图 3(a)和(b)与图 2 相比较可以明显看出除了基本的反对称 A_0 和对称 S_0 模态以外,还存在另外一种模态,即 Quasi-Scholte 模态。图 3(c)所示为波数(实部)与频率的关系,Quasi-Scholte 模态在低频区具有频散的性质,但是随着频率的增加,该模态逐渐趋近于非频散的 Scholte 模态(固体与液体界面处的界面波),点画线 A_{0p} 模态代表自由平板中的 A_0 模态,在这里与覆水平板中 A_0 模态加以区别和比较,发现在低频区覆水平板中没有 A_0 模态,在高频覆水平板和自由平板中 A_0 模态相同;图 3(d)所示为波数(虚部)与频率的关系,在该图中, S_0 模态的虚部非常小,说明 S_0 模态在传播过程中,因能量泄漏引起的能量损失较小。相比而言, A_0 模态的虚部较大,说明 A_0 模态在传播过程中,因能量泄漏引起的能量损失较大。

通过对自由平板和覆水平板中频散曲线的对比分析, A_0 模态的能量会通过平板与水的交界面传递到水中。在低频区, Quasi-Scholte 模态在覆水平板中位移分量较大,对于覆水平板中导波的激发和接收,需考虑 Quasi-Scholte 模态的传播特性。





(c) 波数的实部-频率曲线
(c) Real part of the wavenumber-frequency curve



(d) 波数的虚部-频率曲线
(d) Imaginary part of the wavenumber-frequency curve

图3 厚度1.2 mm钢板一侧在水中时的频散曲线
Fig.3 Dispersion curves of a 1.2 mm thickness free steel plate with one side in contact with water

3 平板中导波模式验证

借助有限元模拟和实验研究,验证 Quasi-Scholte 模式和 A_0 模式在覆水平板和自由平板中的传播特性,为液位测量实验提供理论基础。

3.1 自由平板中 A_0 模式的验证

首先利用 ANSYS 有限元分析软件分析研究自由平板中导波在平板中的传播特性。自由平板的有限元模型采用 2D 实体单元,即 8 节点 PLANE82 单元。自由平板材料参数的定义如表 1 所示。建立平板模型尺寸:板厚 1.2 mm,板长 100 mm。

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,网格划分应尽量规整,网格单元尺寸适当。网格尺寸和积分时间步长通常需要满足关系式:

$$L_{\max} < \frac{\lambda_{\min}}{n_{\min}} = \frac{c_{\min}}{n_{\min}f} \quad \text{且} \quad \Delta t \leq \frac{L_{\min}}{c_s} \quad (3)$$

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, $n_{\min}$ 是每个波长内的最少网

格数(为保证收敛, $n_{\min}$ 取值为 8 ~ 10), c_s 为横波波速, $c_{\min}$ 是弹性波的最小群速度。因此,本模型中 A_0 模式导波波长 3.2 mm,采取单元尺寸为 0.4 mm 的四边形网格进行划分。

对平板模型原点附近的节点施加离面位移载荷。分别模拟了频率为 50、100 和 150 kHz 时自由平板中导波波场。借助于 ANSYS 后处理,在平板边界($Y=0$)上,沿板长 X 方向分别提取 20、40、60 和 80 mm 处节点模拟数据,在本小节以 100 kHz 频率的自由平板中导波波场模拟信号为例,计算总时间设为 80 μs ,时间步长设为 0.1 μs ,如图 4 和 5 所示。

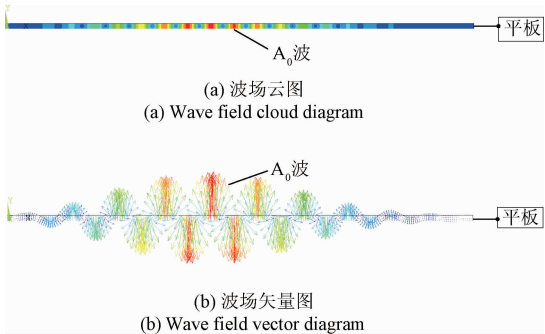
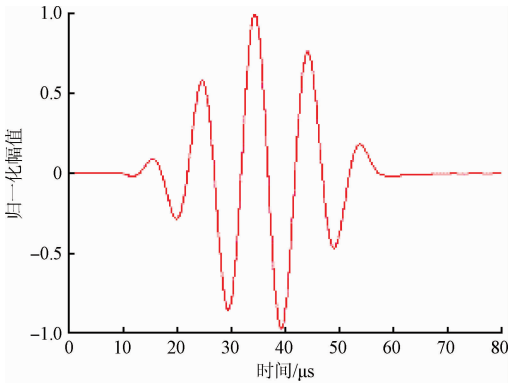
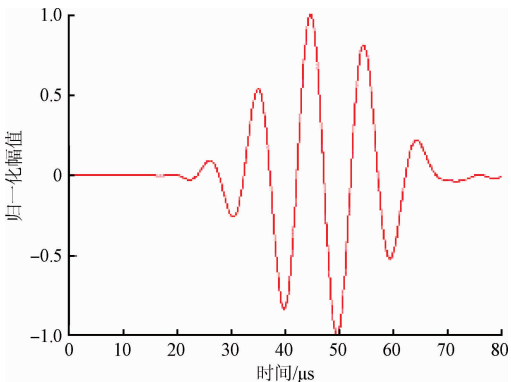


图4 100 kHz 自由平板中导波传播
Fig.4 Simulation results of guided wave in free steel plate at 100 kHz



(a) $X=20$ mm 模拟信号
(a) Simulation signal, $X=20$ mm



(b) $X=40$ mm 模拟信号
(b) Simulation signal, $X=40$ mm

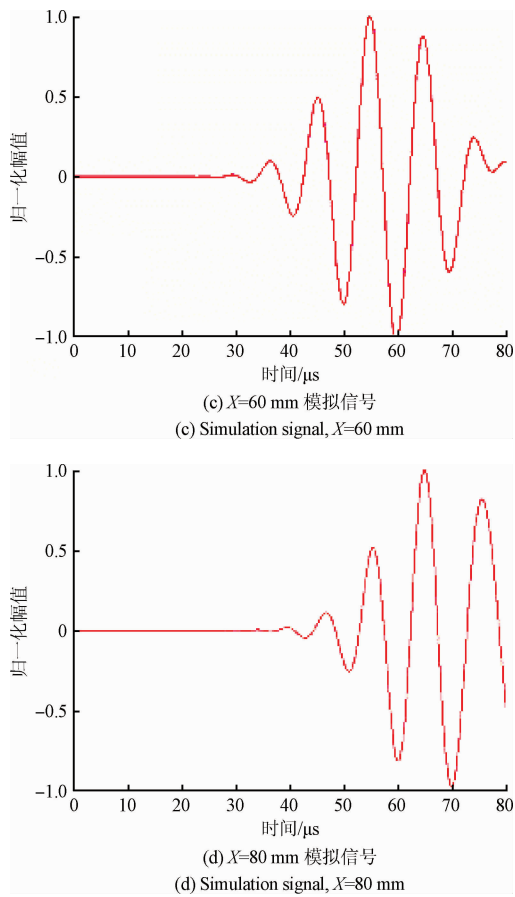


图5 100 kHz 自由平板不同节点处位移模拟信号
Fig.5 Simulation displacement signals of guided waves at different nodes in free steel plate at 100 kHz

图4所示为100 kHz频率时自由平板中导波的波场云图和矢量图。由图4(a)可以看出在平板中存在一种模式,该模式传播较稳定,波形分散程度较小,主波能量最高;由图4(b)可以看出该模式是反对称模式,平板上下表面节点做椭圆运动,中心节点做横向振动。

图5所示为提取自由平板不同位置处节点的位移信号。随着导波传播距离的增加,导波传播的时间也发生变化,可以通过时间差和不同节点之间传播距离求得该导波模式的波速 $1.92\text{ mm}/\mu\text{s}$,根据自由平板的频散曲线,如图2(a)所示,模拟的导波模式与自由平板中 A_0 模式的群速度 $1.925\text{ mm}/\mu\text{s}$ 很接近,误差为0.26%。

通过实验研究来识别自由平板中导波模式,如图1(a)所示,在自由平板的一侧布置压电陶瓷传感器(PZT-5)作为导波的激发和接收传感器,传感器尺寸为 $7\text{ mm}\times 7\text{ mm}$,厚度为 0.2 mm 。传感器之间的距离为 150 mm 。选用激发中心频率 100 kHz 的2.5周期汉宁窗调制正弦波信号作为激发信号,接收传感器得到的导波信号,如图6所示,该模式导波在自由平板中传播时间为 $79.4\text{ }\mu\text{s}$,可以得到导波的传播速度为 $1.89\text{ mm}/\mu\text{s}$,该导波模式与

自由平板中 A_0 模式的群速度 $1.925\text{ mm}/\mu\text{s}$ 很接近,误差为1.82%,如图7所示。图7给出频率为50和150 kHz时 A_0 模式的识别情况,有限元模拟模式匹配误差范围0.26%~4.9%,实验得到的模式匹配误差范围0%~3.1%。

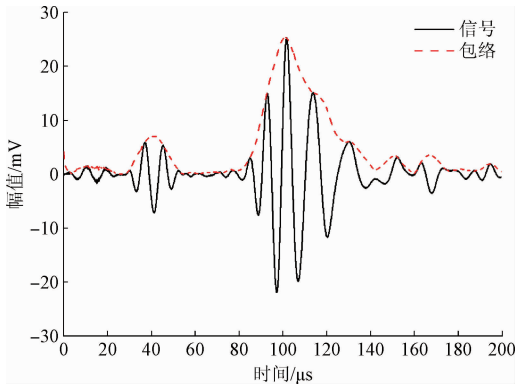


图6 100 kHz 自由平板导波实验信号
Fig.6 Experiment signal of guided wave in free steel plate at 100 kHz

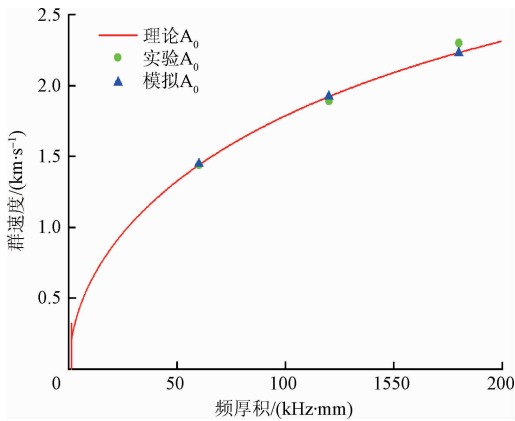


图7 自由平板 A_0 模式识别示意图
Fig.7 Sketch diagram of A_0 modal identification in free steel plate

3.2 覆水平板中 Quasi-Scholte 模式的验证

与第3.1节类似,首先利用ANSYS有限元分析软件研究覆水平板中Quasi-Scholte模式导波的传播特性。平板的有限元模型采用2D实体单元,即8节点PLANE82单元,平板一侧浸入水中,水的模型采用FLUID29耦合场单元,两个单元借助于AGLUE命令粘合在一起。覆水平板材料参数的定义如表1所示。建立平板模型尺寸:板厚 1.2 mm ,板长 100 mm ;耦合场单元的模型尺寸:长 100 mm ,宽 40 mm 。

本模型中模拟导波波长 3.2 mm ,平板中采取单元尺

寸为0.4 mm 的四边形网格进行划分,耦合场采用单元网格尺寸为0.8 mm 的过渡四边形进行网格划分,并设置分段的间隔比率为2,细化耦合场单元网格,能较好地控制网格疏密。

对平板模型原点附近的节点施加离面位移载荷。分别模拟了频率为50、100 和 150 kHz 时覆水平板中导波波场。借助于 ANSYS 后处理,在平板边界($Y=0$)上,沿板长 X 方向分别提取20、40、60 和 80 mm 处节点模拟数据,在本小节以100 kHz 频率的覆水平板中导波波场模拟信号为例,计算总时间设为80 μs ,时间步长设为0.1 μs ,如图8 和9 所示。

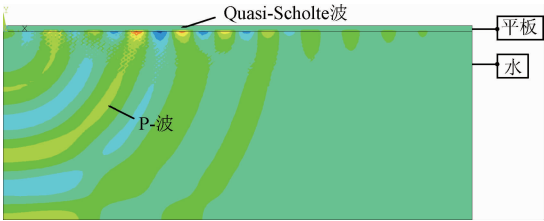


图8 100 kHz 覆水平板中导波传播波场云图
Fig.8 Cloud diagram of guided wave propagation in water loaded steel plate at 100 kHz

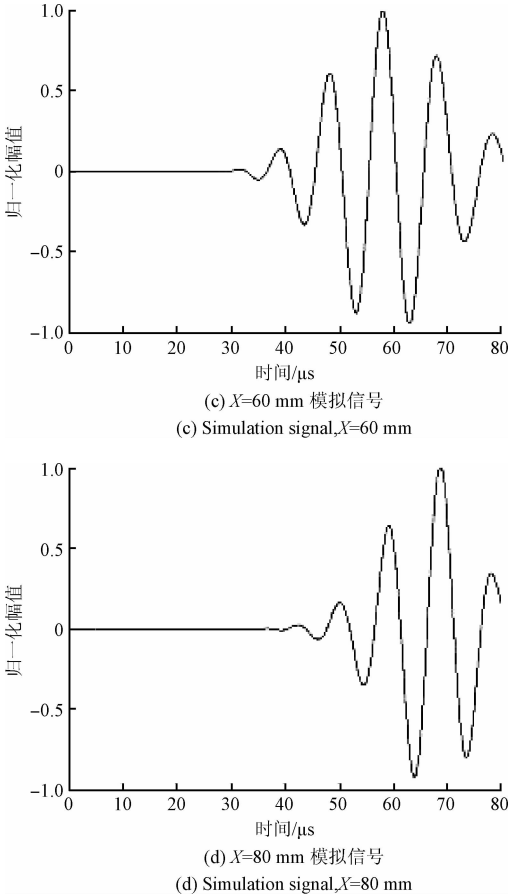
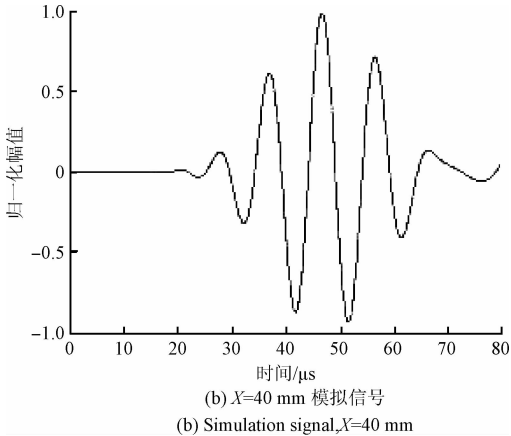
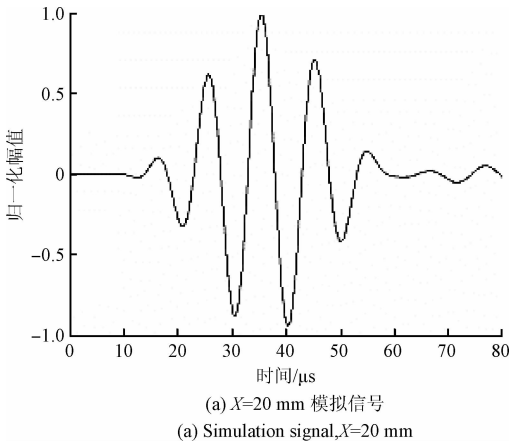


图9 100 kHz 覆水平板不同节点处位移模拟信号
Fig.9 Simulation displacement signals of guided wave at different nodes in water loaded steel plate at 100 kHz

图8 所示为100 kHz 频率时覆水平板中导波波场云图。在该波场中存在 Quasi-Scholte 波和压力波(P-波)。其中,Quasi-Scholte 波沿着平板和水的交界面传播,而在水中传播的是P-波。如图9 所示,提取覆水平板不同位置处节点的位移信号,发现该导波模式的波速1.86 mm/ μs ,与覆水平板中 Quasi-Scholte 模态的群速度1.84 mm/ μs 很接近,误差为1.09%。

如图1(b)所示,通过实验来识别覆水平板中导波模态,在平板的一侧布置压电陶瓷传感器(PZT-5)作为导波的激发和接收传感器,传感器尺寸为7 mm $\times$ 7 mm,厚度为0.2 mm,平板的另一侧浸入水中。传感器之间的距离为150 mm。选用中心频率100 kHz 的2.5 周期汉宁窗调制正弦波信号作为激发信号,接收传感器得到的导波信号,如图10 所示,该模态导波在覆水平板中传播时间为81.1 μs ,可以得到导波的传播速度为1.85 mm/ μs ,与覆水平板中 Quasi-Scholte 模态的群速度1.84 mm/ μs 很接近,误差为0.54%,如图11 所示。图11 给出频率为50 和150 kHz 时 Quasi-Scholte 模态的识别情况,有限元

模拟模态匹配误差范围 1.4% ~2.097% ,实验得到的模态匹配误差范围 0.54% ~1.76% 。

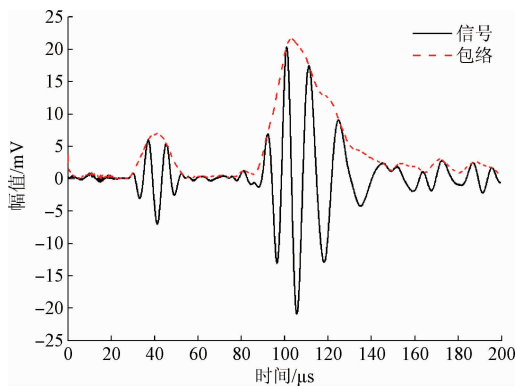


图 10 100 kHz 覆水平板导波实验信号

Fig. 10 Experiment signal of guided wave in water loaded steel plate at 100 kHz

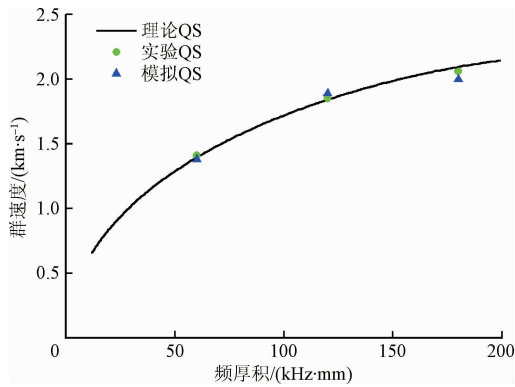


图 11 覆水平板 Quasi-Scholte 模态识别示意图

Fig. 11 Sketch diagram of Quasi-Scholte modal identification in water loaded steel plate

4 水箱液位测量实验

对于一定厚度的平板,导波的波速随频率变化,即频散现象。基于实验和模拟,本文测得了不同频率时 A_0 和 Quasi-Scholte 模态的波速,如图 7 和 11 所示,实验、模拟和理论值吻合较好。对于液位测量而言,本文通过理论推导,建立了液位、时间差和波速之间的理论关系式(方程),由于波速与频率相关,通过方程也可建立液位、时间差和频率间的关系,如图 12 所示。此外,本文选取了 130 kHz 的导波进行实验室验证,实验测得液位与理论值吻合较好。

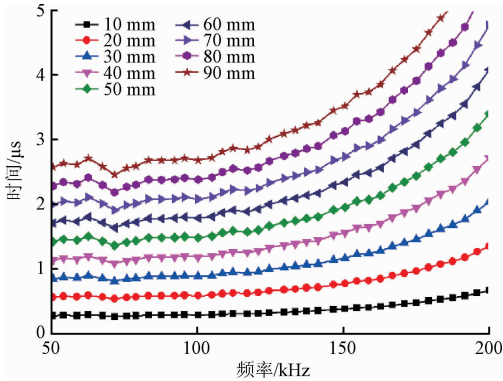


图 12 不同液位时 1.2 mm 平板中激发频率与时间差的关系

Fig. 12 Relationship between excitation frequency and time difference for 1.2 mm thickness plate at different water levels

借助 A_0 模态和 Quasi-Scholte 模态导波在平板中的传播特性,对非侵入式密闭容器液位测量方法进行研究。实验中采用一激一收传感器布置方式获得平板中导波的时间-空间波场,通过分析波信号在平板中传播时间来反应液位变化对波传播的影响。如图 13 所示,实验中平板采用的是厚度为 1.2 mm 的钢板,其材料属性如表 1 所示。激发和接收传感器采用压电陶瓷换能器(PZT-5),换能器的尺寸 7 mm×7 mm,厚度 0.2 mm,传感器通过压电晶片粘合剂固定在密闭容器平板壁面上。任意函数发生器(Tektronix AFG 3022)输出频率 130 kHz 的 2.5 周期汉宁窗调制正弦波信号给激发传感器,激发传感器激发出来的导波沿着导波路径传播,最终被接收传感器接收。

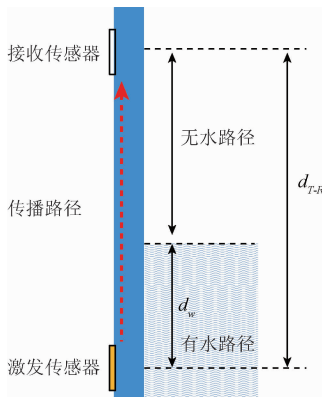


图 13 液位测量实验一激一收装置

Fig. 13 Schematic diagram of water level measurement experiment using pitch-catch configuration

为了研究不同液位(d_w)与导波信号之间的关系,选取不同液位的导波信号进行分析,液位(d_w)变化范围为0~100 mm,以10 mm为间隔。实验中,激发和接收传感器之间的距离(d_{T-R})为100 mm,如图13所示。图13所示导波传播的路径(d_{T-R})包括两部分覆水路径 d_w 和无水路径 $d_{T-R}-d_w$ 。覆水路径 d_w 上传播的是 quasi-Scholte 模态,无水路径 $d_{T-R}-d_w$ 上传播的是 A_0 模态。当密闭容器中液位变化时,会直接改变导波传播的无水路径 $d_{T-R}-d_w$ 和有水路径 d_w 。因此,导波在整个传播路径 d_{T-R} 上的传播时间:

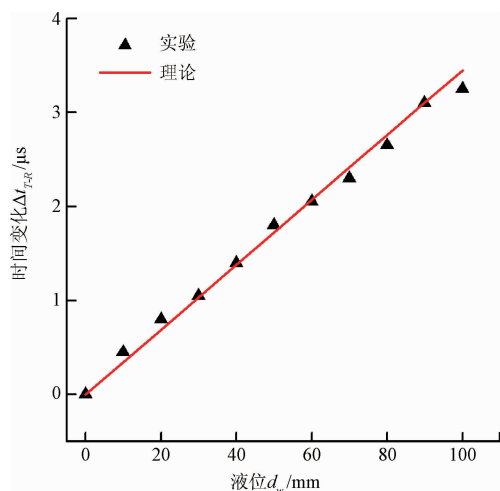
$$t_{T-R} = \frac{d_w}{c_{QS}} + \frac{d_{T-R}-d_w}{c_{A_0}} \quad (4)$$

式中: c_{QS} 是 Quasi-Scholte 模态群速度; c_{A_0} 是 A_0 模态群速度;在130 kHz时, $c_{QS}=2.02 \text{ mm}/\mu\text{s}$, $c_{A_0}=2.1715 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 。 t_{T-R} 是导波在整个传播路径 d_{T-R} 上的传播时间。如果以 $d_w=0$ (自由平板)为时间基准,液位 d_w 变化时导波在整个传播路径 d_{T-R} 上的传播时间差:

$$\Delta t_{T-R} = d_w \left(\frac{1}{c_{QS}} - \frac{1}{c_{A_0}} \right) \quad (5)$$

由式(5)可以看出,液位 d_w 与时间差 Δt_{T-R} 呈线性关系,如图14(a)所示。

由图14(a)可知,液位由0 mm升高到100 mm时,导波在平板中传播的时间线性增加。在实验中,液位每增加10 mm,采集一次导波信号,通过方程可以得到液位的测量值 d_w 与时间差 Δt_{T-R} 线性关系曲线,每次液位的测量值能够很好地反映真实的液位。如图14(b)显示的是不同液位时实验信号,液位为0 mm的信号只有 A_0 模态,液位为30和60 mm的信号含有 A_0 模态和 Quasi-Scholte 模态,液位为100 mm的信号则只有 Quasi-Scholte 模态。



(a) 液位测量值 d_w 和时间差 Δt_{T-R} 的关系曲线
(a) Relationship between the water level d_w and difference of traveling time Δt_{T-R}

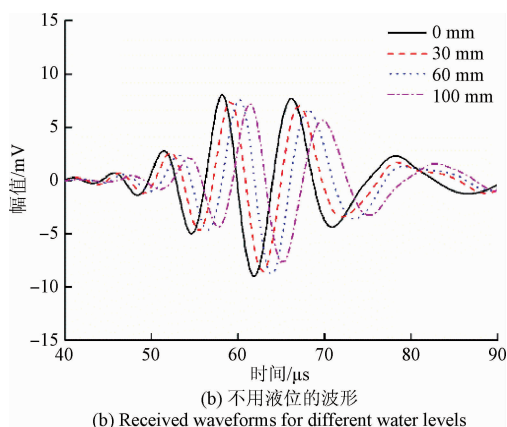


图14 液位测量实验结果

Fig. 14 Water level measurement experiment result

5 结 论

本文研究表明水对平板中超声导波传播有影响。当水存在时,频散方程的波数解为复数。其中,波数实部与导波的波场和传播相关,波数虚部与导波在传播过程中能量的衰减相关。与自由平板中的 Lamb 波相比,当水存在时,除基本的 Lamb 波外,还存在另外一种导波,即 Quasi-Scholte 模态导波。在低频区, A_0 模态存在于自由平板中,而 Quasi-Scholte 模态只存在于覆水平板中。同时,借助于有限元模拟和实验研究,对频率50、100和150 kHz的自由平板和覆水平板中的导波模态验证,分别与 A_0 模态和 Quasi-Scholte 模态频散曲线相吻合。本文提出了一种基于 Quasi-Scholte 模态和 A_0 模态特性的非浸入式液位测量方法,采用一激一收压电传感器布置方式,中心频率130 kHz的2.5周期汉宁窗调制正弦波信号作为检测信号,分析接收到的导波信号,当液位变化时导波在覆水路径和无水路径传播时间发生变化,通过实验验证液位与导波传播时间成线性关系。本文研究成果对液位测量方法研究具有很强的指导意义。

参考文献

- [1] BINGHAM J, HINDERS M, FRIEDMAN A. Lamb wave detection of limpet mines on ship hulls[J]. Ultrasonics, 2009, 49(8): 706-722.
- [2] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展, 应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1713-1735.
HE C F, ZHENG M F, LV Y, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1713-1735.
- [3] 杨理践, 邹金津, 邢燕好. 电磁超声兰姆波在铝板传播中的模态识别[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4): 909-916.

- YANG L J, ZOU J J, XING Y H. Modal identification of electromagnetic ultrasonic Lamb wave propagation in aluminum plate [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(4): 909-916.
- [4] KUNDU T, DI SCALEA F L, SOHN H. Special section guest editorial: Structural health monitoring: Use of guided waves and/or nonlinear acoustic techniques [J]. Optical Engineering, 2016, 55(1): 011001.
- [5] PARK J Y, LEE J R, KOO B Y. Crack detection of immersed metallic structure in water with surface oscillation using scanning laser pulse [J]. International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, 2016, 4(3): 345-352.
- [6] SIDIBE Y, DRUAUX F, LEFEBVRE D, et al. Signal processing and Gaussian neural networks for the edge and damage detection in immersed metal plate-like structures [J]. Artificial Intelligence Review, 2016, 46(3): 289-305.
- [7] WANG Z, WANG Z Q, YU Y T, et al. Research on the underwater echo characteristics by hollow coaxial cylinder-cone assembled elastic shell [J]. Instrumentation, 2015, 2(2): 41-46.
- [8] 王贵恩, 林泽钊, 林育珊, 等. 非接触式城市窨井探测预警系统设计 [J]. 电子测量技术, 2017, 40(1): 110-113 + 122.
- WANG G EN, LIN Z H, LIN Y SH, et al. Design of contactless warning detector for the manholes in the city [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(1): 110-113 + 122.
- [9] 胡宏伟, 彭凌兴, 李雄兵, 等. 多层构件水浸超声自动检测中的水声距优化方法 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1149-1154.
- HU H W, PENG L X, LI X B, et al. Water path length optimization method in automatic immersion ultrasonic testing for multilayer components [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1149-1154.
- [10] 魏萌, 徐科军, 刘铮. 基于特征参数识别的导波雷达物位计信号处理方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 28(4): 542-549.
- WEI M, XU K J, LIU ZH. Signal processing method for guided wave radar level gauge based on feature parameter recognition [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 28(4): 542-549.
- [11] 郭世旭, 刘胜, 陈秀丽, 等. 管道微小泄漏内检测近场声信号特性研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 29(6): 834-844.
- GUO SH X, LIU SH, CHEN X L, et al. Focusing imaging of cracks in pipes based on torsional modes [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 29(6): 834-844.
- [12] YU L, TIAN Z. Case study of guided wave propagation in a one-side water-immersed steel plate [J]. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation, 2015, 3(1): 1-8.
- [13] 钦峰, 谢国利. 电磁超声换能器金属缺陷探测有限元仿真研究 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 39-43.
- QIN F, XIE G L. FE simulation study on detecting steel defects using EMAT [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7): 39-43.
- [14] 张申宇, 邱雷. 导波结构健康监测系统软件数据管理模块设计 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(2): 54-58, 77.
- ZHANG SH Y, QIU L. Design of guided waves structural health monitoring system software data management module [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(2): 54-58, 77.
- [15] 杨理践, 吕瑞宏, 刘斌, 等. 电磁超声兰姆波模态能量密度分布特征研究 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2602-2610.
- YANG L J, LV R H, LIU B, et al. Research on the distribution of energy density of modal identification of electromagnetic ultrasonic lamb wave propagation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2602-2610.
- [16] SCHAAL C, BISCHOFF S, GAUL L. Damage detection in multi-wire cables using guided ultrasonic waves [J]. Structural Health Monitoring, 2016, 15(3): 279-288.

作者简介



徐鸿, 分别在 1982 年和 1984 年于华北电力大学获得学士学位和硕士学位, 1998 年于德国斯图加特大学获得博士学位, 现为华北电力大学教授、博士生导师, 主要研究方向为结构健康监测和超声无损检测技术。

E-mail: xuhong@ncepu.edu.cn

Xu Hong received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from North China Electric Power University in 1982 and 1984, respectively, and received his Ph. D. degree in 1998 from University of Stuttgart, Germany. Now, he is a professor and doctoral supervisor in North China Electric Power University. His main research interest includes structural health monitoring and ultrasonic nondestructive testing technology.



郭鹏 (通讯作者), 2010 年于河南城建学院获得学士学位, 2013 年于华北电力大学获得硕士学位, 现为华北电力大学博士生, 主要研究方向为超声导波检测技术。

E-mail: guopeng0228@163.com

Guo Peng (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2010 from Henan University of Urban Construction and M. Sc. degree in 2013 from North China Electric Power University. Now, he is a Ph. D. student in North China Electric Power University. His main research interest includes ultrasonic guided wave testing technology.