

超声导波在充液埋地管道结构传播特性的理论研究与试验验证

赵乃志^{1,2}, 陈桂凤²

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 扬州工业职业技术学院
建筑工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要 目的 针对内部载有液体并且埋置地面以下某一深度或者水下管道健康监测的难点问题, 推导出充液埋地管道超声导波频散曲线方程, 用来确定管道健康监测的激发频率和模态. 方法 利用 Navier - Stokes 方程在势函数中耦合一个附加的位移场方程并引进第二类 Hankel 函数, 推导出充液埋地管道的频散曲线方程并进行试验验证. 结果 通过埋地充液状态下管道试验系统测得的群速度和衰减与推导出的频散曲线方程的理论值相差 1.05%, 基本符合. 结论 附加位移场方程可以模拟超声导波在土中传播情况, 第二类 Hankel 函数可以表征波的能量从管中扩散到很远距离并且逐渐衰减消失的这种特性进而推导出超声导波在充液埋地管道中传播的频散和衰减曲线, 根据频散曲线可以确定管道健康监测激发频率和模态.

关键词 管道; 超声导波; 频散曲线; PZT; Hankel 函数

中图分类号 TU375; TM282 文献标志码 A

Theoretical and Experimental Studies of the Propagation Characteristics of Ultrasonic Guided Liquid in Pipeline Structure Buried in Soil

ZHAO Naizhi^{1,2}, CHEN Guifeng²

(1. School of Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi, China, 214122; 2. School of Civil Engineering, Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou, China, 225127)

Abstract: The purposes of the paper is propose to draw the dispersion curve equation of liquid - filled buried pipeline, and propose a damage identification method for pipeline structure with water and buried in soil using piezoelectric guided waves. The Navier's Equation and the second Hankel function are used to derive the dispersion curve equation of the water-filled pipeline buried in soil and experimental studies. The results show that the velocity and attenuation of the model are in good agreement with the theoretical values of the dispersion curve at some different excitation fre-

收稿日期: 2017-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308357); 江苏省高校自然科学基金项目(16KJB560024); 江苏高校“青蓝工程”资助项目; 江苏省第五期“333 高层次人才培养工程”资助项目

作者简介: 赵乃志(1973—), 男, 副教授, 博士, 主要从事智能材料与结构健康监测研究.

quencies. The derived longitudinal modal dispersion curve can be used as a theoretical guide for excitation frequency and mode selection. The second Hankel function can be used to characterize the energy of the wave from the pipeline to long distance and gradually disappearance and then deduce the ultrasonic wave in the pipeline in the filling fluid, Derive the dispersion and decay curves and determine the pipeline health monitoring excitation frequency and mode.

Key words: pipeline; ultrasonic guided waves; dispersion curves; PZT; Hankel function

在役管道经常是内部载有液体并且埋置在地面以下某一深度或者是水下. 由于外部和土层或者是其他液体紧密接触, 所以导波可以透过管道扩散到土中或者周围液体中, 形成衰减. 研究波在管道中传播规律从而确定管道损伤情况进而判定管道的健康情况具有重要的意义.

很多研究者在管道的健康检测方面开展了研究, 阎石科研团队^[1-7]从理论上分析了管道结构中三种模态导波的传播特性. 根据推导出导波的频散方程, 通过数值方法绘制出了导波的频散曲线, 利用试验验证了所建立的频散曲线的有效性. 利用 Navier 方程及边界条件建立频散方程并进行数值求解, 分别绘制出空管和充液两种情况下的导波频散曲线. 王学浦等^[8]研究了纵向模态超声导波在部分埋置于土壤中的管结构中的传播特性, 基于弹性动力学理论, 分别计算和分析了自由管和埋地管的群速度和衰减特性, 并建立了不同埋地长度的有限元模型, 分析了不同埋地长度对导波传播速度和衰减的影响. 刘增华等^[9]从理论上得到了充非黏性液体管道中纵向超声导波的频散方程. 基于此, 笔者从 Navier - Stokes 方程开始, 在势函数中耦合一个附加的位移场方程来模拟超声波在土中的传播情况, 引入第二类 Hankel 函数模拟管道中传播的超声导波泄漏到管中液体和管周围土中造成的能量衰减, 推导出埋地充液工况下管道的频散曲线, 并进行试验验证. 结果表明附加位移场方程可以模拟超声导波在土中传播情况, 第二类 Hankel 函数可以表征波的能量从管中扩散到很远距离并且逐渐

衰减消失的这种特性进而推导出超声导波在充液埋地管道中传播的频散和衰减曲线, 根据频散曲线可以确定管道健康监测激发频率和模态.

1 管道 - 土体系中导波传播基本理论

管道 - 土体系中的导波传播波动方程可以根据三维弹性波动理论进行求解. 计算模型如图 1 所示, z 方向为轴向方向尺寸无限长, 假定管道内径为 a , 外径为 b , 设定坐标系的 z 轴与管道的长度方向轴线重合. 计算模型中假设管道和土均为各向同性体线弹性体, 管土之间耦合良好.

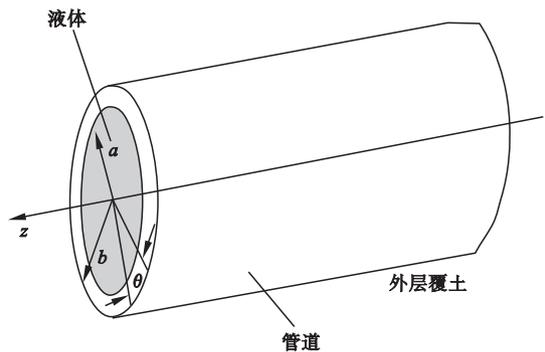


图 1 管道计算模型

Fig. 1 Calculation model

根据的 Navier 空心管的理论, 从 Navier - Stokes 方程开始, 运动方程为

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

$$\bar{u} = \nabla \Phi + \nabla \times H_T. \quad (2)$$

式中: μ 和 λ 为管道的 Lamé' 常数; ρ 为材料密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; \bar{u} 为势函数^[10]. Φ

为压缩标量势函数, H_T 为等体积矢量势函数.

土和管道的紧密接触耦合为在管道中传播的超声导波泄漏提供了机会, 一部分波的能量会传播到周围土壤中去, 因此传感器的接收到的回波信号能量会损失一部分. 实际检测中也必须考虑这种情况的影响, 笔者从以下两个方面提出了解决方案进行理论研究并进行试验验证.

(1) 在势函数中耦合一个附加位移场方程来模拟超声波在土中的传播情况. 如式(3):

$$u_z = A e^{i(kz - \omega t)} e^{-\alpha' z} \quad (3)$$

式中: u_z 为附加的位移场, m ; A 为位移场初始幅值, m ; α' 为管道周围土体的衰减系数, 根据试验确定 z 波的传播距离^[11].

(2) 引入 Hankel 函数模拟管道中传播的超声导波泄漏到管中液体和土壤中造成的能量衰减.

Hankel 函数的一个明显特征就是渐进性, 可以表征导波通过管道周围土扩散到一定距离并且逐渐衰减消失的这种特征. 笔者在 Navier - Stokes 方程中的标量势函数中引

入第二类 Hankel 函数来模拟波的衰减, 表达式为

$$f = B_5 H_0^{(2)}(\alpha' r). \quad (4)$$

式中: B_5 为 Hankel 函数系数; $H_0^{(2)}$ 为第二类 Hankel 函数 H_0 族正则解; α' 为土的衰减参数; r 衰减半径, m ^[12-13].

第二类 Hankel 函数其渐进特性随变量变化而变化, 如图 2 所示.

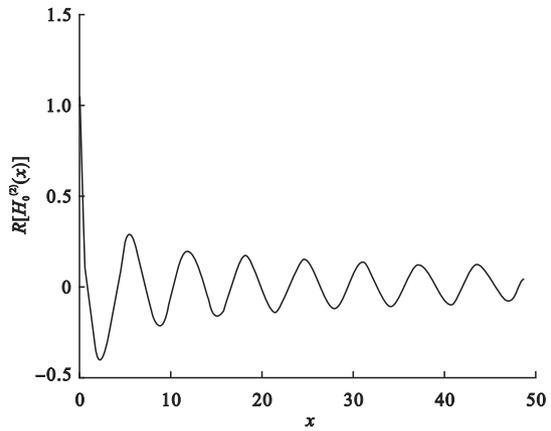


图 2 Hankel 函数

Fig. 2 Hankel function

将 Hankel 函数代入到应力及位移表达式中, 可以得到式(5) ~ (8)^[14-15].

$$\sigma_r' = \left\{ B_5 \left[-(\lambda'(a^2 + k^2) + 2\mu\alpha'^2) H_0^{(2)}(\alpha' r) + 2\mu\alpha' \frac{H_1^{(2)}(\alpha' r)}{r} \right] - B_6 \left[i2\mu' k (\beta' H_0^{(2)}(\beta' r) - \frac{1}{r} H_1^{(2)}(\beta' r)) \right] \right\} e^{i(kz - \omega t)}, \quad (5)$$

$$\sigma_{rz}' = \{ B_5 [i2\mu' k \alpha' H_1^{(2)}(\alpha' r)] + B_6 [\mu' (k^2 - \beta'^2) H_1^{(2)}(\beta' r)] \} e^{i(kz - \omega t)}, \quad (6)$$

$$u_r' = \{ -B_5 [\alpha' H_1^{(2)}(\alpha' r)] + B_6 [ik H_1^{(2)}(\beta' r)] \} e^{i(kz - \omega t)}, \quad (7)$$

$$u_z' = \left\{ -B_5 [ik H_0^{(2)}(\alpha' r)] + B_6 \left[\frac{2}{r} H_1^{(2)}(\beta' r) - \beta' H_0^{(2)}(\beta' r) \right] \right\} e^{i(kz - \omega t)}. \quad (8)$$

其中, μ' 、 λ' 为土的 Lamé' 常数; ρ 为材料密度; $H_0^{(2)}$ 、 $H_1^{(2)}$ 第二类 Hankel 函数 H_0 、 H_1 族正则解; β' 为波扩散到土壤中的入射角; B_5 、 B_6 为 Hankel 函数系数^[3].

当方程组的系数行列式等于零, 即可得到充液埋地的频散方程, 对系数行列式进行求解可以得到埋地充液工况下管道的频散曲线, 即波数 k 和频率 f 的关系方程.

2 频散曲线的计算与分析

通过 Matlab 计算程序可以计算绘制出埋地充液管道中 L 模态导波的相速度和衰减频散曲线, 通过换算公式可以计算相应的群速度频散曲线. 对计算得到的频散曲线进行归一化处理可以得到图 3 所示的曲线.

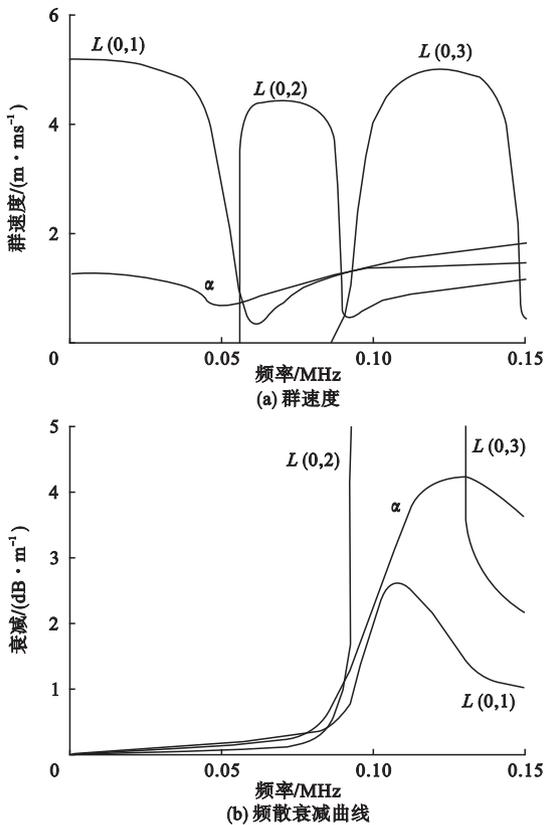


图3 导波的频散曲线和衰减曲线

Fig. 3 Guided wave dispersion curve and attenuation curve

根据图3并结合相关文献中的导波模式归一化径向和轴向位移分布规律,可以得出以下结论:

(1)在0~0.15 MHz,和空心管道频散曲线比较载液埋地管道中多了一个轴对称模式- α 模式.和L模式导波相比,但 α 模式的群速度要低得多,最大值仅为2 013 m/s;所以 α 模式导波虽然频散和衰减都比较小,并不适合用做激发模式.

(2)在群速度频散曲线中, $L(0,2)$ 模式导

波的群速度在频段在0.060~0.080 MHz频段内,接近于一条直线;速度变化在4 800~4 510 m/s, $L(0,2)$ 模式的频散和衰减均很小, $L(0,2)$ 模式传播以轴向位移为主,因此, $L(0,2)$ 模式适合用做激发模式.

(3)管道埋在土中或者水下时,纵向导波在传播过程中由于能量泄漏到土中或者水中引起的散射衰减和黏弹性介质的吸收衰减不同程度存在于所有纵向模式导波中,监测中必须考虑.

(4)在0~0.15 MHz内, $L(0,1 \sim 0,3)$ 模式导波群速度都达到峰值,并且在群速度峰值附近频散曲线趋于平坦,表明这个区段导波频散和衰减都相对较小.可以结合轴向位移和应力波结构分布规律在平坦区内选择合适频率和模式用于健康监测^[16-18].

3 试验系统

为了验证理论推导出的结论,笔者构建了试验系统进行验证,如图4所示.包括RIGOL DG1任意波形信号发生器、PZT压电传感器、功率放大器、管道系统、埋土装置、加水和回水装置、数字示波器和计算机,管道系统采用《流体输送用无缝钢管国家标准》(GB T8163—1999)中的Q235无缝钢管,钢管直径为159 mm,壁厚为4.5 mm,其余参数见表1.

表1 材料参数

Table 1 Parameters of materials

主要参数	纵波波速/ ($m \cdot s^{-1}$)	横波波速/ ($m \cdot s^{-1}$)	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)
钢管	5 760	3 260	7 950
覆土	1 500	300	—
水	1 500	—	—

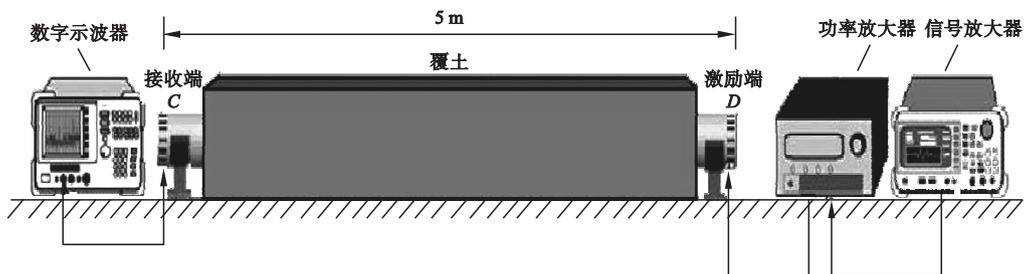


图4 试验系统布置图

Fig. 4 The experimental system

为了在管道激励出特定频率的 $L(0,2)$ 模式,选取经 Hanning 窗函数调制的 5 个周期的单音频信号,激励频率为 70 kHz^[19]. 激励信号的波形图及频谱图如图 5 所示.

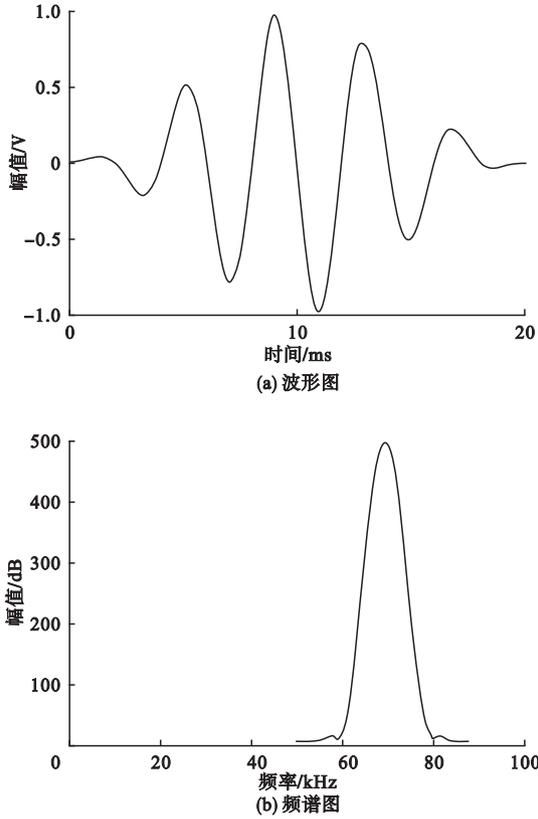


图 5 激励信号
Fig. 5 Excitation signal

采用的 PZT 陶瓷片作为信号的激发和接受传感器,16 片 PZT 陶瓷片在管道端部的圆周并排对称布置. PZT 传感器为长度伸缩型 PZT 陶瓷片(具体参数见表 2),利用粘合剂粘贴在钢管的端部,陶瓷片的长度方向平行管道轴向.

表 2 PZT 陶瓷片材料参数

Table 2 PZT material parameters

长 × 宽 × 厚/mm	谐振频率/kHz	机电耦合系数	阻抗/ Ω	压电常数
20 × 4 × 0.5	68 ~ 76	> 0.38	7.4	> 700

4 试验结果与分析

图 6 为激发频率为 70 kHz,埋土深度为

0.3 m 充满水的管道中接收到的回波信号. 可以看出,在 0 ~ 0.008 s,共接收到 4 次清晰地端面回波,没有发生畸变,并且长距离传播后衰减比较小,可以获得较高的信噪比.

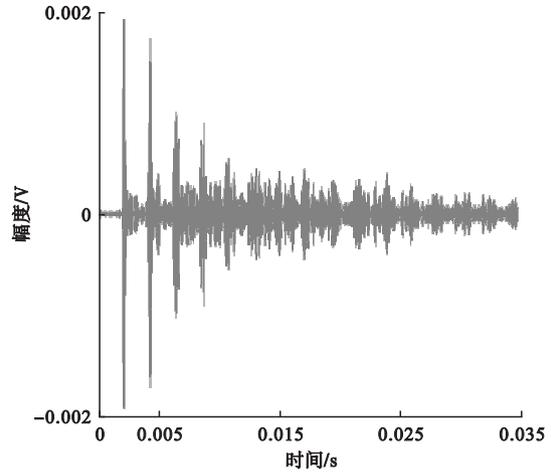
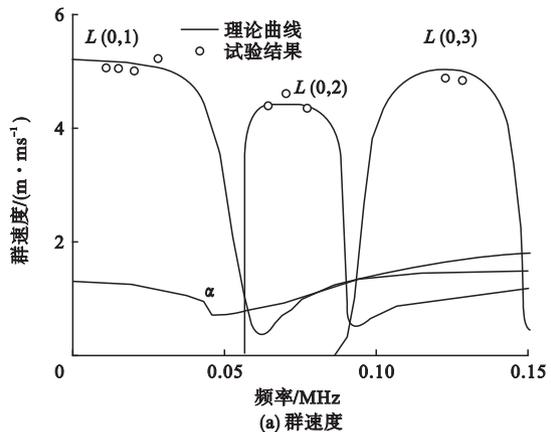


图 6 埋地充水管道的接收的回波信号
Fig. 6 End-reflected signals of 70 kHz under 0.3 m depths of soil cover

通过自编程序对数据信号进行处理,4 次端部回波的传播总时间为 7.963 ms,计算确定超声导波在管道中传播速度为 $2 \times 5 \times 4 / (7.963 \times 10^{-3}) = 4\ 680$ m/s,根据式(9)、(10)计算出的理论群速度值为 4 730 m/s,二者相差为 1.05%,试验值和理论值基本符合.

图 7 给出了管道在埋地 0.3 m 深充水状态下部分不同激发频率下试验测得模式的群速度和衰减与理论频散曲线比较图,可知试验值和理论值吻合得很好.



(a) 群速度

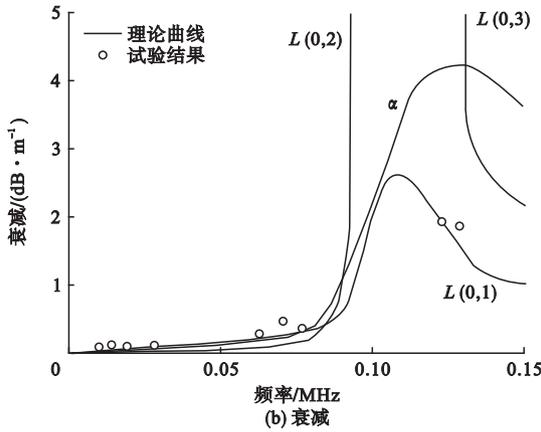


图7 充水管道中群速度和衰减曲线

Fig. 7 Guided wave dispersion curve and attenuation curve of pipe in water-filled

5 结论

(1) 利用 Navier - Stokes 方程在势函数中耦合一个附加的位移场方程并引进第二类 Hankel 函数推导出充液埋地管道的频散曲线方程, 第二类 Hankel 函数的渐进性可以表征波的能量从管中扩散到很远距离并且逐渐衰减消失的这种特性。

(2) 根据推导出的频散曲线方程画出埋地充液管道中纵向模态超声导波的相速度和衰减频散曲线, 得出结论 α 模态导波虽然频散和衰减都比较小, 但波速低, 不适合用做激发模态。 $L(0, 1 \sim 0, 3)$ 模态导波群速度都达到峰值, 并且在群速度峰值附近频散曲线趋于平坦, 表明这个区段导波频散和衰减都相对较小。可以结合轴向位移和应力波结构分布规律在平坦区内选择合适频率和模态用于健康监测的激发频率。

(3) 通过对试验验证绘制出管道在埋地 0.3 m 深充水状态下部分不同激发频率下试验测得模态的群速度和衰减值得与理论频散曲线比较图, 试验值和理论值吻合的很好。

(4) 激发频率为 70 kHz 的 $L(0, 2)$ 模态导波接收到的回波信号在 0 ~ 0.008 s 时间段内, 共接收到 4 次清晰地端面回波, 并且没有发生畸变, 并且长距离传播后衰减比较小,

可以获得较高的信噪比。

参考文献

- [1] 阎石, 何彬彬, 赵乃志. 管结构导波频散曲线绘制与试验验证 [J]. 工程力学, 2012, 29 (2): 159 - 163.
(YAN Shi, HE Binbin, ZHAO Naizhi. Experimental validation and plotting guided wave dispersion curve of pipe structure [J]. Engineering mechanics, 2012, 29 (2): 159 - 163.)
- [2] 阎石, 刘丁嘉, 李赢, 等. 利用压电导波层状管道结构的损伤识别 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2016, 32 (4): 619 - 626.
(YAN Shi, LIU Dingjia, LI Ying, et al. Damage identification for layered pipe structures using piezoelectric guided waves [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32 (4): 619 - 626.)
- [3] 赵乃志. 利用压电超声导波时间反转法的管道裂纹健康监测研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
(ZHAO Naizhi. Research on pipeline structural crack monitoring by using PZT-based ultrasonic guided waves time reversal method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.)
- [4] 齐霁. 基于 PZT 超声导波的多裂纹管道损伤识别研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014.
(QI Ji. Research on multiple crack pipeline structural monitoring by using PZT-based ultrasonic guided waves [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014.)
- [5] 阎石, 程杨, 王伟. 层状管道结构频散曲线绘制及试验验证 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2016, 32 (1): 45 - 50.
(YAN Shi, CHENG Yang, WANG Wei. Plotting and experimental validating of guided wave dispersion curves for layered pipe structures [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32 (1): 45 - 50.)
- [6] 阎石, 张海凤, 蒙彦宇. Lamb 波频散曲线的数值计算及试验验证 [J]. 华中科技大学学报, 2010, 27 (1): 1 - 4.
(YAN Shi, ZHANG Haifeng, MENG Yanyu. Numerical calculation and experimental validation for Lamb wave dispersion curves [J]. Journal of huazhong university of science and technology, 2010, 27 (1): 1 - 4.)
- [7] 赵乃志, 阎石, 齐霁. 基于时间反转法的管道周向裂缝损伤检测 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2013, 29 (1): 44 - 49.

- (ZHAO Naizhi, YAN Shi, QI Ji. The pipeline circumferential cracks damage detection based on time reversal method[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(1):44-49.)
- [8] 王学浦,张慧昕,何存富,等.纵模导波在部分埋地管道中的传播特性[J].无损检测,2009,31(11):901-909.
(WANG Xuepu, ZHANG Huixin, HE Cunfu, et al. The propagation characteristics of longitudinal guided wave in steel pipe partly buried in soil[J]. Nondestructive testing, 2009, 31(11):901-909.)
- [9] 刘增华,颜小东,吴斌,等.基于连续小波变换的厚壁管道周向导波扫描成像实验研究[J].机械工程学报,2013,49(2):14-18.
(LIU Zenghua, JIE Xiaodong, WU Bin, et al. Experimental research on circumferential guided wave scanning imaging of thick wall pipes based on continuous wavelet transform [J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49(2):14-18.)
- [10] PADMAKUMAR P, ROSE J L. Ultrasonic guided wave inspection of a titanium repair patch bonded to an aluminum aircraft skin[J]. International journal of adhesion and adhesives, 2010, 30(7):566-573.
- [11] 尹晓春.复合筒结构中的周向导波[D].南京:南京大学,2008.
(YIN Xiaochun. Guided circumferential waves in multi-layered hollow cylinders [D]. Nanjing: Nanjing University, 2008.)
- [12] ROSE J L. Guided wave nuances for ultrasonic nondestructive evaluation [J]. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, 2000, 47(3):575-583.
- [13] ROBIN E J, FRANCESCO S, MICHAEL J S L, et al. The effect of bends on the long-range microwave inspection of thermally insulated pipelines for the detection of water[J]. Journal of nondestructive evaluation, 2011, 31(2):117-127.
- [14] 王强,孙丽华.非线性 Lamb 波结构早期损伤监测研究[J].压电与声光,2016,38(1):170-173.
(WANG Qiang, SUN Lihua. Early structural damage detection based on nonlinear lamb wave[J]. Piezoelectrics & acoustooptics, 2016, 38(1):170-173.)
- [15] 潘群,王强.主动 Lamb 波结构损伤监测中的非线性信号提取[J].压电与声光,2014,36(35):814-816.
(PAN Qun, WANG Qiang. Nonlinear signal extraction process for active Lamb wave based structural damage monitoring [J]. Piezoelectrics & acoustooptics, 2014, 36(35):814-816.)
- [16] MOHAMMAD H S, SALEH D. Study on the effect of a new construction method for a large span metro underground station in Tabriz - Iran [J]. Tunnelling and underground space technology, 2010(25):63-69.
- [17] 罗更生,谭建平,卢超,等. $L(0,2)$ 模态导波检测弯管缺陷的数值模拟和实验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(9):3029-3036.
(LUO Gengsheng, TAN Jianping, LU Chao, et al. Numerical simulation and testing research for defect detection in bend pipes using longitudinal mode $L(0,2)$ [J]. Journal of central south university (science and technology), 2014, 45(9):3029-3036.)
- [18] 孔双庆.管道超声导波检测的数值模拟和实验研究[D].大连:大连理工大学,2011.
(KONG Shuangqing. Numerical simulation and experimental investigation of defect detection in pipes using ultrasonic guided waves [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.)
- [19] LIEW J Y R. Survivability of steel frame structures subject to blast and fire[J]. Journal of constructional steel research, 2008, 64(7/8):854-866.