

超声导波在管中传播的理论分析与试验研究*

王秀彦 王智 焦敬品 吴斌 何存富
(北京工业大学机电学院 北京 100022)

摘要: 采用分布式 PZT 传感器在管中激励和接收超声导波。根据在管状波导中传播的超声波具有频散现象及多模态特征, 选择具有单一频率的特定信号激励超声波, 使其频散最小; 同时采用分布式传感器抑制不同模态的波型。其试验结果与理论预测相吻合。

关键词: 超声导波 频散 模态 管道

中图分类号: O348

0 前言

无损检测技术是现代工业产品制造和使用过程中不可或缺的检测手段之一, 广泛应用于各种工业领域。一些形式较为特殊的结构, 如管道, 是无损检测中经常遇到的检测对象。这些大型结构的常规无损检测特别耗时, 只因为探头需对所检结构逐点扫描^[1,2]。使用超声导波技术, 如柱面导波, 是解决这一问题具有潜在吸引力的方法^[3]。在结构的一点激励超声导波, 由于导波本身的特性(沿传播路径衰减很小), 其可以沿构件传播非常远的距离, 最大可达几十米。若接收探头位于距激励源较远处, 则接收信号就包含了有关发射和接收两点间结构整体性的信息。因此, 这种技术实质上是监测了一条线, 而非一点, 大大节省了检测时间, 提高了检测效率。另一方面, 由于超声导波在管的内外表面和中部都有质点的振动, 声场遍及整个壁厚, 因此整个壁厚都可被检测。这就意味着既可检测构件内部缺陷, 也可检测内外表面缺陷。这是超声导波与传统超声波技术相比所具有的最突出的两大特点。由于压力管道的广泛应用, 管道的长距离超声导波快速检测研究近年来受到国内外无损检测学者的极大关注^[4,5]。因此研究超声导波在结构中的激励和接收问题, 对将导波技术应用在工程中具有重要的学术意义和很好的应用前景。研究了采用分布式 PZT 传感器在管中激励和接收超声导波。根据在管状波导中传播的超声波具有频散现象及多模态特征, 选择具有单一频率的特定信号激励超声波, 使其频散最小; 同时采用分布式传感器抑制不同模态的波型。

1 管中的纵向导波

考虑在无限长弹性管(如图 1 所示)中传播的弹性波^[6], 其边界条件为

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0 \quad \text{当 } r = a, r = b$$

假设质点的位移分量为

$$\begin{aligned} u_r &= U_r(r) \cos n\theta \cos(\omega t + kz) \\ u_\theta &= U_\theta(r) \sin n\theta \cos(\omega t + kz) \\ u_z &= U_z(r) \cos n\theta \sin(\omega t + kz) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 u_r, u_θ, u_z ——径向、周向和轴向位移分量
 U_r, U_θ, U_z ——径向、周向和轴向位移幅度
 n ——圆周方向的阶次
 $n = 1, 2, 3, \dots$
 ω ——角频率
 k ——波数

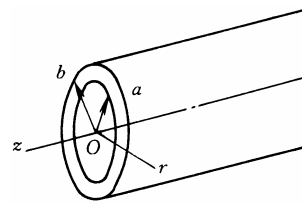


图 1 圆管示意图

在管中沿 z 方向传播的超声波存在三种不同的模态, 即纵向(轴对称)模态、扭转(轴对称)模态和弯曲(非轴对称)模态, 且当 $n = 0$ 时对应于轴对称模态, $n \neq 0$ 对应于非轴对称模态, 分别记为 $L(0, m)$, $T(0, m)$ 及 $F(n, m)$ 。这里, $m = 1, 2, 3, \dots$ 。

求解管中超声波的位移场, 最终归结为求解以下频散方程。

$$D = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{26} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{61} & c_{62} & \dots & c_{66} \end{vmatrix} = 0$$

* 国家自然科学基金(19972003)、北京市自然科学基金重点项目(3011001)、教育部骨干教师资助计划和北京市教委科技合同资助项目。20020710 收到初稿, 20030715 收到修改稿

式中 c_{ij} ——函数 $c_{ij} = c_{ij}(a, b, \lambda, \mu, \rho, k, \omega)$
 a, b ——内径, 外径
 λ, μ ——材料的 Lames 常数
 ρ ——密度

1.1 纵向轴对称模态

当 $n = 0$ 时, 超声波的模态为轴对称, 则频散方程可分解为二个行列式的积

$$D = D_1 D_2 = 0$$

$$\text{式中 } D_1 = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{14} & c_{15} \\ c_{31} & c_{32} & c_{34} & c_{35} \\ c_{41} & c_{42} & c_{44} & c_{45} \\ c_{61} & c_{62} & c_{64} & c_{65} \end{vmatrix} \quad D_2 = \begin{vmatrix} c_{23} & c_{26} \\ c_{53} & c_{56} \end{vmatrix}$$

$D_1 = 0$ 和 $D_2 = 0$ 的解分别对应于轴对称纵向模态 $L(0, m)$ 和扭转模态 $T(0, m)$ 。对于纵向轴对称模态, 其质点位移无周向分量, 即 $u_\theta = 0$; 而对于扭转模态, 其质点位移只有周向分量, 即只有 $u_\theta \neq 0$ 。在实际应用中, 纵向模态较扭转模态更适用、方便。

因为在试验中, 纵向导波更容易激励, 重复性也较好, 并且可对圆管周向 360° 全范围检测。

1.2 纵向弯曲模态

当 $n = 1, 2, 3, \dots$ 时, 超声波的模态为非轴对称弯曲模态 $F(n, m)$ 。此时, 频散方程的解比轴对称情况下复杂的多。三个位移分量同时存在, 且相互耦合。这给试验带来很大困难。但在实际中, 由于缺陷的非对称性, 致使缺陷回波通常具有非轴对称性, 尽管纵向模态较弯曲模态也容易激励, 重复性也较好, 但研究弯曲模态更具有普遍性。

2 频散曲线数值计算

纵向模态的理论结果可以用其相速度或群速度频散曲线来表示, 其径向、轴向位移的分布形态对于试验的指导也是至关重要的。对于典型的钢管, 其计算结果如图 2 所示。钢管的外径 $D = 88.8 \text{ mm}$, 壁厚 $d = 4 \text{ mm}$, 纵波速度 $c_L = 5\,960 \text{ m/s}$, 横波速度

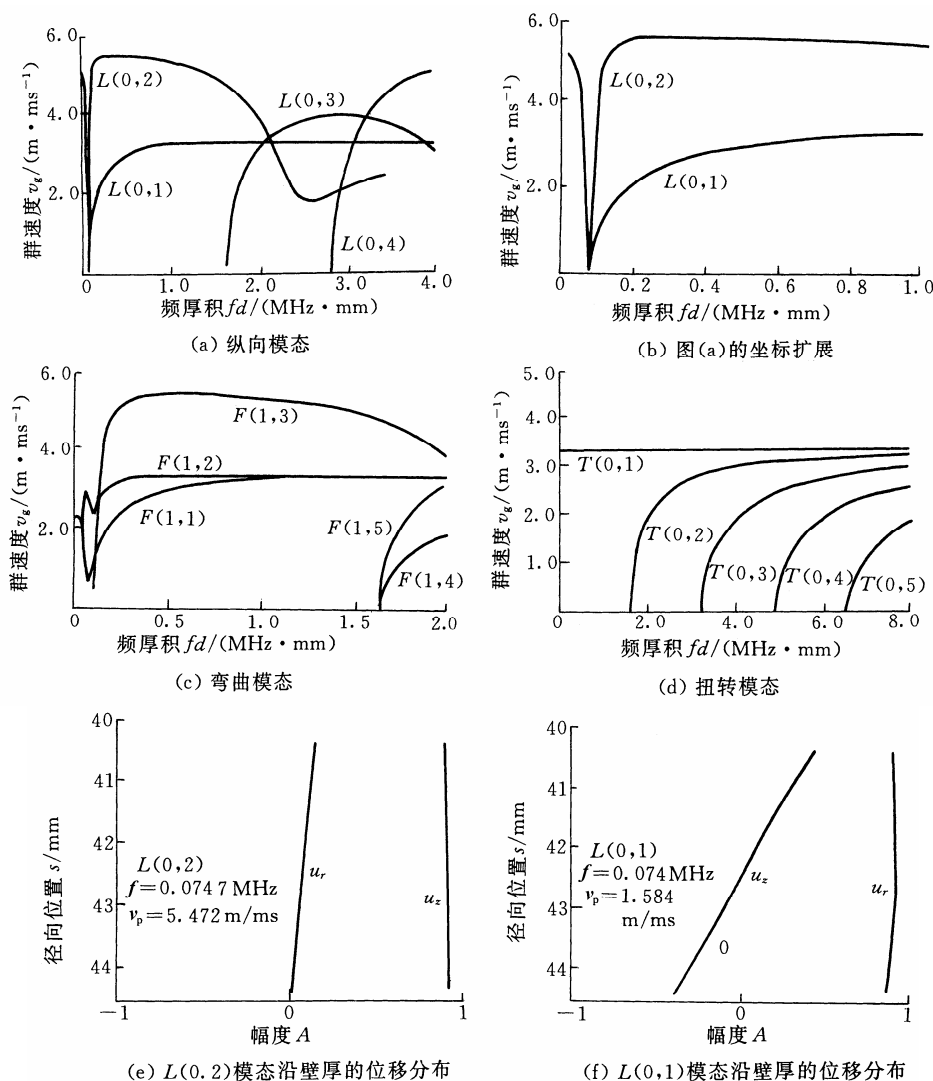


图 2 钢管的群速度频散曲线以及位移分布曲线

$c_T = 3\ 260\ \text{m/s}$ 。密度 $\rho = 7.932\ \text{g/cm}^3$ 。

从图 2 中可以看出：

(1) 不同模式的波，其频散程度不同，而同一模式在不同的频率范围，其频散程度也不同。

(2) 对于轴对称 $L(0,2)$ 模式的导波，在相当宽的频带内(40~100 kHz)，该模式是非频散的，且其群速度最大。

(3) 轴对称 $L(0,2)$ 模式，在频率约为 74 kHz 时，在管的内外表面的轴向位移相对较大，而内外表面的径向位移相对较小。

(4) 而轴对称 $L(0,1)$ 模式恰恰相反，在频率约为 74 kHz 时，管内外表面的径向位移相对较大且同向，而内外表面的轴向位移相对较大但反向，并且管壁内部存在零位移点。

这些模式特征，对于试验有很大的指导意义。

3 试验研究

根据以上数值模拟图 2a、b 结果可以看出，若在试验中选择频率约为 70 kHz 附近的 $L(0,2)$ 模式，则意味着激励信号的形状(即包络线)和幅度随着传播距离的增大都保持相对不变，并且任何其他模式均落后于此模式到达接收器，这易于在时域内区分感兴趣的信号。根据数值模拟(图 2e)结果可以看出， $L(0,2)$ 模式对于任何圆周位置的内外表面缺陷具有相同的灵敏度，很适合于探测内外表面的缺陷。同时，波在传播过程中能量泄漏现象相对较小。传播距离相对较大。因此，在该试验中主要研究 $L(0,2)$ 模式。

3.1 试验装置

试验装置示意图如图 3 所示。

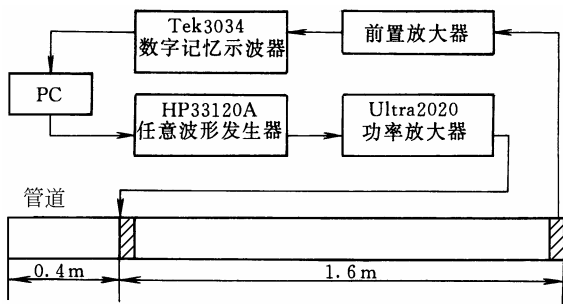


图 3 试验装置示意图

由 PC 和 HP33120A 构成的任意波形发生器可以产生任意激励信号，该激励信号经 Ultra2020 功率放大器进行功率放大。将该放大信号加于由多个长度伸缩型 PZT 片构成的探头环，产生向左右二方向传播的超声导波。向右传播的超声波到达右管端时

被接收探头环所接收；向左传播的超声波到达左管端发生反射后，继续向右传播，到达右管端时被接收探头环所接收，这样依次往复。接收到的信号经前置放大器放大后，在数字示波器上显示，再到计算机处理。

3.2 探头选取

为了产生沿管轴向传播的轴对称纵波，激励和接收探头都采用长度伸缩型压电陶瓷片。在圆周方向均匀分布 16 片 $12\ \text{mm} \times 3.2\ \text{mm} \times 0.5\ \text{mm}$ 的 PZT 片，在厚度方向施加激励电压，在长度方向产生伸缩，压电常数采用的是 d_{31} 。并且 16 个激励片是并联激励，16 个接收片是并联接收。在管的外表面涂上绝缘漆层，将压电陶瓷片采用 502 胶水粘贴在管表面。

3.3 激励信号选取

为使被激励的信号在传播过程中频散现象尽可能的降低，原理上激励信号应选取单频信号。考虑到严格的单频信号很难产生，在试验中只能选择频带较窄的信号。从数值模拟的结果可知，在 70 kHz 附近， $L(0,2)$ 模式几乎没有频散。因此该试验中选取经海宁窗调制的 70 kHz 正弦信号，其震荡周期为 10 周。经功率放大器放大后，峰峰值达 150 V。其时域波形和频域图如图 4 所示。

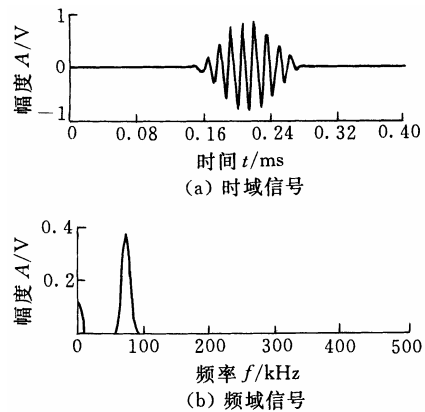


图 4 激励信号图

3.4 信号增强与处理

由图 2 可知，当激励信号频率为 70 kHz 时，不仅可以激励 $L(0,2)$ 模式波，同时还可以激励很多其它模式波，如 $L(0,1)$ 、 $T(0,1)$ 、 $F(1,1)$ 、 $F(1,2)$ 、 $F(1,3)$ 等。尽管 $L(0,2)$ 波最先到达，但其他模式波对 $L(0,2)$ 模式形成一种干扰，尤其在有缺陷回波的情况下更是如此。据参考文献[7]报道，当沿圆周方向分布的压电传感器个数大于在该频率处可激励的最高模式数，由于各个弯曲模式间的相消干涉，会大大抑制弯曲模式波，从而增强纵向模式波。因此，在试验

中选取 16 片压电陶瓷片(最高弯曲模态为 14 阶), 以便抑制弯曲模态。

为了提高信噪比, 由数字记忆示波器连续采集 256 个响应信号并进行平均, 可以获得较好的信噪比。

3.5 试验结果

采用图 3 所示的试验装置, 分四种情况进行试验。

(1) 激励信号的频率不变(70 kHz), 激励探头为

16 片, 而接收探头分别 16 片、8 片和 4 片。

(2) 激励信号的频率不变(70 kHz), 接收探头为 16 片, 而激励探头分别 16 片、8 片和 4 片。

(3) 激励信号的频率不变(70 kHz), 激励和接收探头都为 8 片。

(4) 激励探头和接收探头都为 16 片, 而激励信号频率分别为 70 kHz、120 kHz 和 30 kHz。

其试验结果如图 5 所示(注: 小图题编号 16—16 等为接收和激励探头数)。

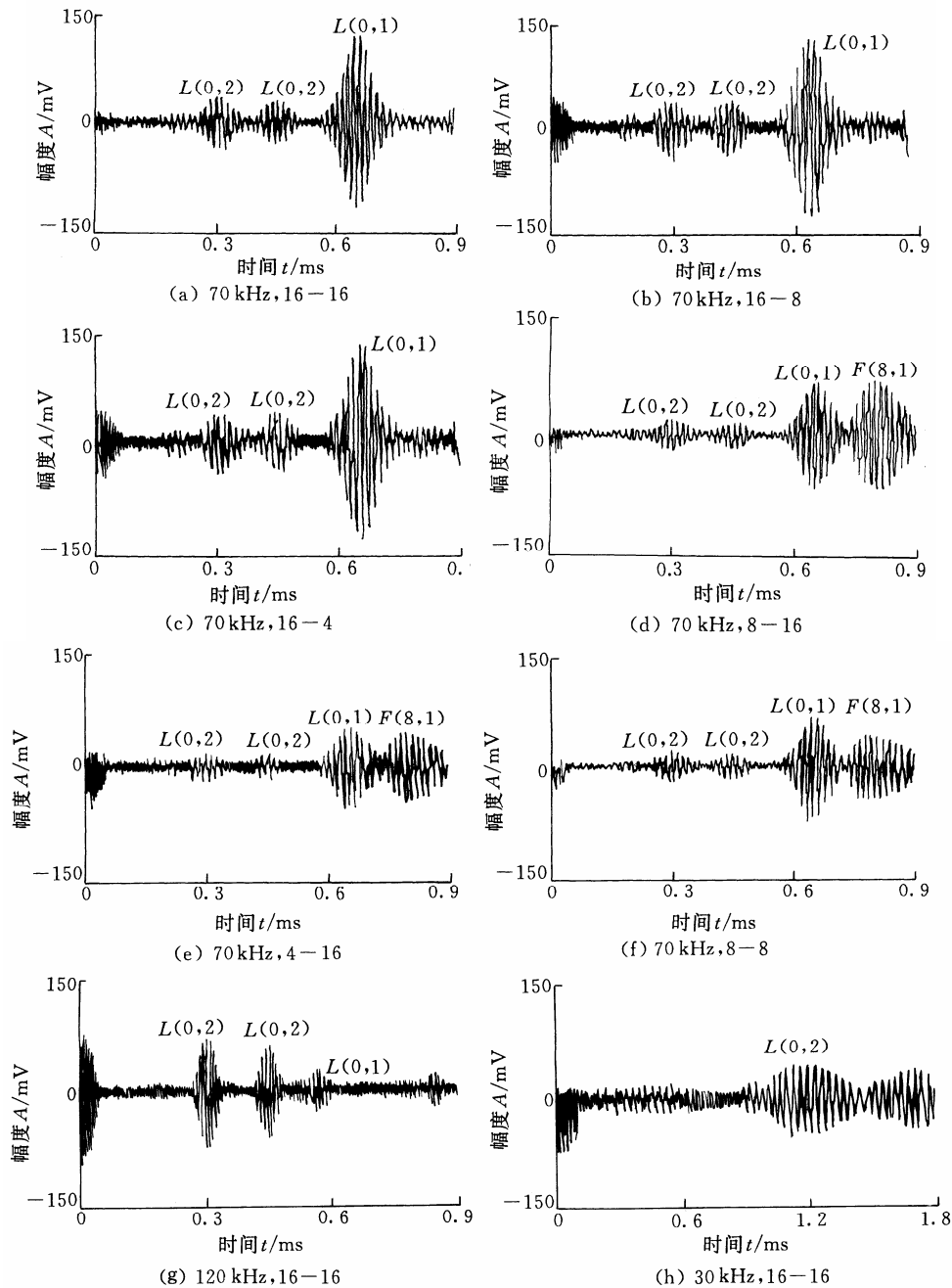


图 5 试验结果

3.6 试验结果分析

图 5a、b 和 c 是当激励信号频率为 70 kHz, 激励探头为 16 片, 而接收探头分别为 16 片, 8 片和 4

片时获得的波形结果。

从图 5 可明显看出: 三个图中的波形大致相同, 都出现了 L(0,2)模态波形和 L(0,1)模态波形, 且波形

极为清晰。在图中, 第一个 $L(0,2)$ 模态波形为激励探头产生的波形向右传播(见图 3), 到达右端被接收探头所接收的波形; 第二个 $L(0,2)$ 模态波形为激励探头产生的波形向左传播, 到达管左端, 经反射后向右传播, 再一次到达管右端被接收探头接收的波形。图中幅度最大的波形为 $L(0,1)$ 模态波形, 由于它的波速较慢, 约为 $L(0,2)$ 模态波形波速的一半(见图 2b), 因而位于 $L(0,2)$ 模态波形的后方。

由于激励探头和接收探头近似于均匀分布在圆管的周向, 因此不会出现扭转模态 $T(0,m)$ 。但当激励探头片数少于一定数量时, 会在一定程度上出现弯曲模态。比较图 5a、b 和 c 可看出: 在图 5b 和 c 中, $L(0,1)$ 模态波形的后方均可见幅度较小的波形, 这是模态 $F(8,1)$ 的波形。但在 16 片接收条件下的图 5a 中, 该模态波形已被明显抑制。

图 5d、e 是激励信号频率为 70 kHz, 接收探头为 16 片, 而激励探头数目分别为 8 片和 4 片时获得的波形结果。

比较图 5a、d 和 e, 可明显看出: 由于激励探头数目不同, 各图中的波形差异很大。首先, 从幅度上看, 图 5a 的波形幅度远远大于图 5d, 而图 5d 又大于图 5e。其次, 在图 5d 和 e 中都出现了另一模态波形 $F(8,1)$, 位于 $L(0,1)$ 模态波形之后, 并且幅度很大, 与 $L(0,1)$ 的幅度相当。可见, 即使同为 16 片探头接收, 由于激励探头数目不同, 波形将发生明显变化。

图 5f 是激励信号频率为 70 kHz, 接收探头为 8 片, 激励探头也为 8 片时获得的波形。其结果与图 5d 的结果相类似。

当其他条件相同, 激励频率不同时的试验结果如图 5g 和 h 所示。图 5g 和 h 分别是频率为 120 kHz 和 30 kHz, 激励探头和接收探头都为 16 片时获得的波形结果。由于频率不同, 作为激励信号的 10 个周期的单音频信号在时域上表现为宽度不同, 图 5g 中的激励信号与接收信号都较 70 kHz 信号窄。同时由于频率的增高, $L(0,2)$ 模态波速变化很小, 但幅度明显变大, 而 $L(0,1)$ 模态波速变化较大, 幅度也随之大大减小, 此时, $L(0,2)$ 模态既是波速最快, 同时波形幅度又较大, 更有利于检测管道缺陷。而当频率为 30 kHz 时, 见图 5h, $L(0,2)$ 模态幅度减小, $L(0,1)$ 模态有明显频散现象, 已经不适合用于管道检测。

4 结论

(1) 利用本试验装置, 可方便的在管道中激励和接收到超声导波。

(2) 在其他条件相同的情况下, 激励端探头数目及布置对管道中激励的导波模态波形起决定性作用。

(3) 当多片探头均匀分布在管道圆周时, 不会产生扭转模态波形。但在激励探头数目少于一定数量时, 会在一定程度上出现弯曲模态。此时, 仍然可以产生纵向模态波形。这与理论分析是一致的。

(4) 在探头均匀布置的情况下, 当接收探头数目相同时, 激励探头数目的多少对抑制弯曲模态波形的出现起主要作用。

(5) 当激励探头数目相同时, 接收探头数目的多少对抑制弯曲模态波形的出现起辅助作用。

(6) 在一定频率变化范围内(70~100 kHz), 频率越大, 接收信号在时域中越窄, $L(0,2)$ 模态幅度越大, 而其他模态幅度减小。

参 考 文 献

- 1 Rose J L. Recent advances in guided wave NDE. IEEE Ultrasonics Symposium, 1995: 761~770
- 2 Alleyne D N, Cawley P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multi-mode signals. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 89(3): 1 159~1 168
- 3 Alleyne D N, Cawley P. Optimization of Lamb wave inspection techniques. NDT&E International, 1992, 25(1): 11~22
- 4 Lowe M J S, Alleyne D N, Cawley P. Defect detection in pipes using guided waves. Ultrasonics, 1998, 36(2): 147~154
- 5 Rose J L, Ditri J J, Pilarski A, et al. A guided wave inspection technique for nuclear steam generator tubing. NDT & E International, 1994, 27(6): 307~310
- 6 Gazis D C. Three dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. Analytical Foundation. J. of the Acoustics Society of America, 1959, 31(5): 568~573
- 7 Alleyne D N, Cawley P. The excitation of lamb waves in pipes using dry coupled piezoelectric transducer. Journal of Nondestructive Evaluation, 1996, 15(1): 11~20

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF ULTRASONIC GUIDED WAVES PROPAGATION IN PIPES

Wang Xiuyan Wang Zhi Jiao Jingpin

Wu Bin He Cunfu

(Beijing University of Technology)

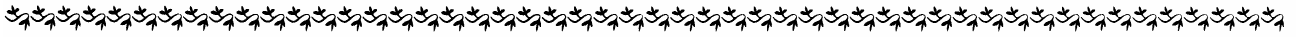
Abstract: Using distributed PZT transducer, ultrasonic guided

waves are generated and received in a pipe. Because multiple modes of guided wave propagation are possible in pipes and these modes are generally dispersive, the specific exciting signal of a Hanning windowed toneburst with a central frequency of 70 kHz is selected for decreasing the effect of dispersion. And guided wave are generated using 16 distributed PZT transducer in a circumferential direction for suppressing flex-

ural modes. The experimental results are good agreement with the theoretical ones.

Key words: Ultrasonic guided waves Frequency disperse Modes Pipes

作者简介: 王秀彦, 女, 1966 年出生, 副教授, 博士研究生。主要从事现代测控技术与方法等科研工作, 发表论文 20 余篇。



《机械工程学报》被 EI 收录论文目次(2002 年第 9 期)

- 含摩擦和间隙直齿轮副的混沌与分叉研究 王三民 沈允文 董海军 (8)
- 一种变胞机构——魔术花球的自由度分析 李端玲 戴建生 张启先等 (12)
- 高压细水雾灭火喷嘴的雾化特性研究 范明豪 周 华 杨华勇 (17)
- 截面形状对材料微孔洞损伤破坏的影响 张 光 张克实 冯 露等 (22)
- 非线性油膜力轴承上不平衡弹性转子的稳定裕度 李银山 陈予恕 薛禹胜 (27)
- 柔性冗余度机器人残余振动随机最优控制 宋轶民 余跃庆 张 策等 (33)
- 虚拟企业运营过程中项目分解和计划策略研究 潘晓弘 蔡方中 程耀东等 (38)
- 端面流体膜密封角向摆动自振产生及其半频特性的阐释 徐万孚 刘雨川 王之栋等 (43)
- 液压恒压网络压力控制研究 董宏林 吴盛林 姜继海 (47)
- 微型机械薄膜结构在量子力作用下的稳定性和粘附问题 丁建宁 杨继昌 蔡 兰等 (52)
- 基于数字—符号法的空间 4 自由度并联机构位置正解 范守文 徐礼钜 周肇飞 (57)
- 电流变流体控制元件的设计理论及试验 朱石沙 王启新 魏宸官 (61)
- 基于耦合机制的并行设计环境理论与方法 钟 掘 胡志刚 (65)
- 考虑边缘接触的弧齿锥齿轮承载接触分析 方宗德 邓效忠 任东锋 (69)
- 分阶式双渐开线齿轮啮合特性分析 樊智敏 张光辉 (73)
- 径向可倾瓦轴承的热弹流润滑分析 常秋英 孟永钢 温诗铸等 (77)
- 任意边界域映射建模理论及模具设计应用 徐趁肖 齐红元 朱衡君等 (83)
- 电流变液体性能的试验研究 陈淑梅 魏宸官 (87)
- 动态油膜—柔性转子系统混沌运动的控制 于洪洁 吕和祥 (91)
- 数控机床误差的激光干涉仪自动瞄准测量及补偿技术研究 张 虎 周云飞 唐小琦等 (96)
- 并联机床不同位形下的运动精度评价指标 李铁民 郑浩峻 汪劲松等 (101)
- VC 轧辊静载凸度的克雷洛夫函数解及结构参数分析 赵长财 刘助柏 李纬民 (106)
- 基于实物的复杂曲面零件反求工程中未知区域测量数据补充及曲面重构技术 瞿建武 李江雄 柯映林 (110)
- 超环面行星蜗杆传动弹流润滑状态研究 许立忠 杨育林 黄 真 (114)
- 气动汽车发动机工作循环的理论分析 俞小莉 元广杰 沈瑜铭等 (118)
- 基于知识的轿车前轮罩设计系统研究 葛安林 程 义 任金东等 (123)
- 基于有限元法的风力机塔架结构动态分析 陆 萍 秦惠芳 栾芝云 (127)
- 曲面 5 轴加工中全局干涉检查与刀位修正 蔡永林 席 光 樊宏周等 (131)
- 钢锭凝固与偏析形成的多元合金连续介质模型 徐达鸣 司广踞 李庆春等 (136)
- 自然海水中低合金铸铁点蚀的化学—电化学溶解机理 夏兰廷 韦 华 (140)
- 注塑成形制品收缩过程的数值模拟 祝铁丽 王敏杰 (145)
- CY 泵与 SPB 泵自冷却性能比较 闻德生 潘景升 吕世君等 (150)
- 基于有限元法的湿式磨削温度场分析 王 霖 葛培琪 秦 勇等 (155)