

# 超声柱面导波技术及其应用研究进展\*

何存富 吴 斌 范晋伟

北京工业大学机电学院, 北京 100022

**摘 要** 综述无损检测中的超声柱面导波技术及其应用研究进展. 给出导波的频散及多模式特征, 着重评述超声导波的模式和频率选择、导波的激励和接收方法、导波与缺陷的相互作用、信号处理与特征提取以及导波技术在无损检测中的应用前景.

**关键词** 超声导波, 频散, 管道, 无损检测

## 1 引 言

无损检测技术是现代工业产品制造和使用过程中不可缺的检测手段之一, 广泛应用于各种工业领域. 一些形式较为特殊的结构, 如管、板等, 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<sup>[1~5]</sup>. 使用超声导波技术(如柱面兰姆波、板波等)是解决这一问题具有潜在吸引力的方法<sup>[6,7]</sup>. 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(或板)的内外(上下)表面和中部都有质点的振动, 声场遍及整个壁厚(或板厚), 因此整个壁厚(或板厚)都可被检测. 这就意味着既可检测构件内部缺陷, 也可检测两表面缺陷. 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. 无损检测界对超声导波的研究热情, 还在于需要检测的结构类型、范围等不断扩大, 如后张力钢筋混凝土结构中的钢棒或钢绞丝<sup>[8]</sup>、煤矿和隧道用岩石螺栓等, 使得常规的超声检测手段受到局限, 从而希望用导波技术来充实并提高无损检测水平. 而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<sup>[9,10]</sup>. 因此研究超声导波在结构中的传播理论及导波技术在工程中的应用具有重要的学术意义和广阔的应用前景. 本文对国内外超声柱面导波技术(板波也做简介)及其在无损检测中应用的最新研究进展作一综述.

## 2 导波的频散及多模式特征

超声波在板、棒及空心圆柱壳等波导中传播时, 由于结构的厚度这种特征几何尺寸的影响, 使得在结构中传播的超声波的速度将依赖于波的频率, 从而导致超声波的几何弥散, 也就是说

收稿日期: 2000-02-28, 修回日期: 2000-07-05

\* 国家自然科学基金(19972003)、北京市自然科学基金(3992006)、北京市教委科技合同项目和高等学校骨干教师资助计划资助

导波中相速度随频率的不同而改变, 这种现象称之为频散 (频散也可由材料本身的物理性质所致, 如非线性效应, 这称为物理弥散). 另一方面, 在这种频散系统中, 对于任何给定的频率, 至少存在两种模式<sup>[1]</sup>, 它们以不同的群速度传播. 如同时激励并接收到两个模式的超声波如图 1 所示, 并假定它们在超声导波中传播的距离相同. 由于模式 1 的群速度大于模式 2 的群速度, 故模式 1 导波较模式 2 导波要提前到达接收探头. 反映在模式 1 导波较模式 2 导波在时间轴上靠前. 但群速度快并不意味着相速度就快. 群速度与相速度间的关系如下<sup>[4]</sup>

$$V_g = V_{ph}^2 / \left[ V_{ph}^2 - (fd) \frac{dV_{ph}}{d(fd)} \right] \tag{1}$$

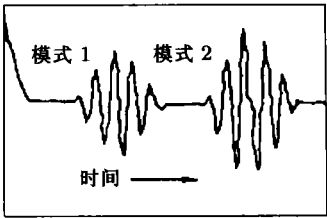


图 1 多模式图波接收信号

实际中, 某一特定模式的波通常是采用具有一定带宽的脉冲来激励, 则不同频率分量的超声波将以不同的速度传播, 这就意味着超声波的脉冲形状 (即包络线) 要随传播距离的变化而变化. 如果频散现象比较严重, 信号包络线的峰值幅度随传播距离的增加迅速减小, 降低了信号的信噪比, 导致信号的特征提取与识别变得困难起来, 使得长距离检测非常困难. 另一个问题是多模式的存在使得问题复杂化. 在低频率 - 厚度积的情况下至少存在二个模式. 随着频厚积的增长, 会产生更多的模式. 即使激励了单模式的超声波, 在边界或其他不连续处, 如缺陷, 也要发生模式转换. 因此接收到的信号通常包含二个或二个以上的模式, 多模式的信号处理是必然的. 这些难度致使超声导波技术在无损检测领域中的应用受到限制. 但是, 随着对导波理论的深入理解, 超声导波技术的潜力会被大大开发.

研究导波的频散曲线及振动位移分布 (质点位移振幅与板层位置关系), 对于模式选择、激励频率、能量泄漏以及特定模式对缺陷灵敏度的研究都有指导意义, 对导波无损检测的有效性影响很大.

对于板波而言, 其频散曲线是通过求解下列 Rayleigh-Lamb 超越方程, 求得其相速度 (或者波数) 与频率厚度积的关系<sup>[5]</sup>

$$\frac{\tan \omega d \sqrt{(c^2 - c_2^2)/c^2 c_2^2}}{\tan \omega d \sqrt{(c^2 - c_1^2)/c^2 c_1^2}} + \left( 4 \frac{\sqrt{[(c/c_1)^2 - 1][(c/c_2)^2 - 1]}}{[2 - (c/c_2)^2]^2} \right)^{\pm 1} = 0 \tag{2}$$

这里,  $\omega = 2\pi f$  为角频率;  $2d$  为板厚;  $c_1, c_2$  分别为纵波和横波速度;  $c$  为板波的相速度;  $+1$  次方和  $-1$  次方分别对应对称和非对称模式的 Lamb 波.

板波的相速度、群速度的频散曲线<sup>[6]</sup> 如图 2 所示. 从图中可以看出, 除了  $s_0, a_0$  模式外, 其它所有模式的兰姆波都有截止现象. 在截止频率以上该模式兰姆波是可以传播的, 而在该截止频率以下该模式兰姆波是迅速衰减的, 是不能传播的.

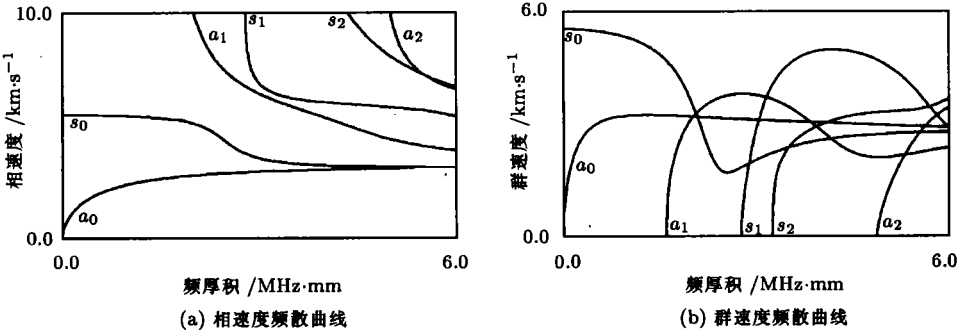


图 2 钢板的兰姆波频散曲线<sup>[6]</sup>

板中的位移分布形态是在不同频厚积条件下选择合适模式的重要依据之一。Alleyne et al.<sup>[5]</sup> 给出了非对称 Lamb 波沿板厚质点振动的位移分量表达式，其典型模式的分布图如图 3 所示。

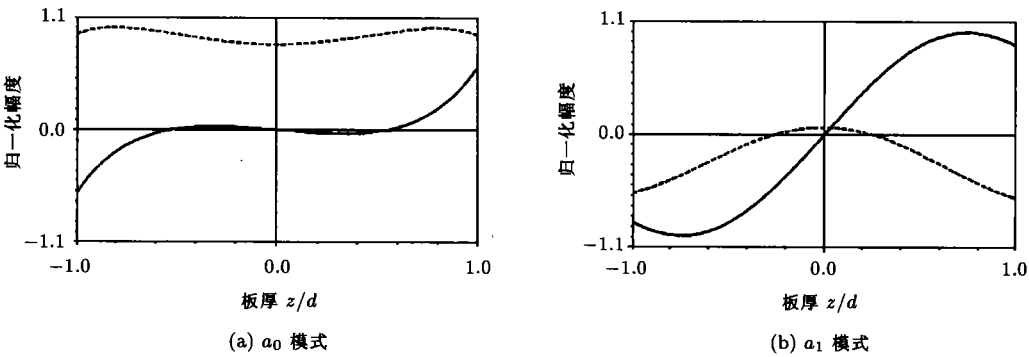


图 3 钢板的兰姆波位移形态<sup>[5]</sup> (激励频率为 3 MHz)  
(--- 为板厚方向, —— 为平行板方向)

这里需要说明的是图 2 及图 3 都是在给定材料性质的情况下 (图 3 是在给定频率的情况下) 计算得到的。不同的材料、不同的频率其差别很大。

超声波在管道中的传播比在平板中要复杂得多。假设超声波的位移场具有谐波形式，通过在一定边界条件下 (如自由状态或承受水压等) 求解波动方程，可以解得圆柱壳中超声波的位移场和应力场。而频散方程<sup>[7]</sup> 如下：

$$\begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{26} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ C_{61} & C_{62} & \cdots & C_{66} \end{vmatrix} = 0 \tag{3}$$

这里， $C_{ij}$  是管径尺寸 (内径  $a$ 、外径  $b$ )、材料的 Lames 常数  $\lambda, \mu$ 、密度  $\rho$ 、频率  $\omega$  以及波数  $k$  的函数。

令该行列式等于零求得的根即是相速度与频率厚度积的关系。由于在圆柱坐标系中所采用的势函数形式具有 Bessel 函数，所求得的位移场比较复杂。Gazis<sup>[11,12]</sup> 最早求解了这个  $6 \times 6$  矩阵；Lowe<sup>[13]</sup> 将这一矩阵编制成通用的计算机程序，并已商业出售。图 4 是 40# 钢管 (内径为

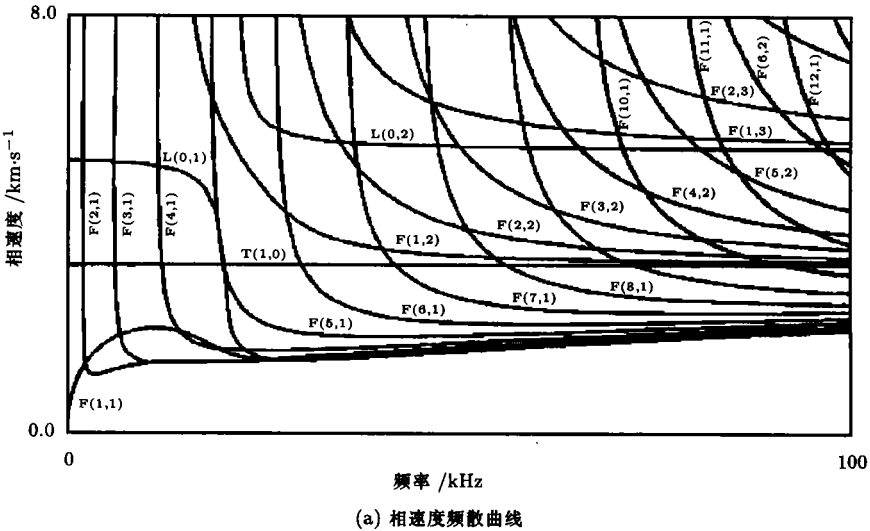


图 4 40# 钢管 (内径 76 mm, 壁厚 5.5 mm) 的频散曲线<sup>[9]</sup>

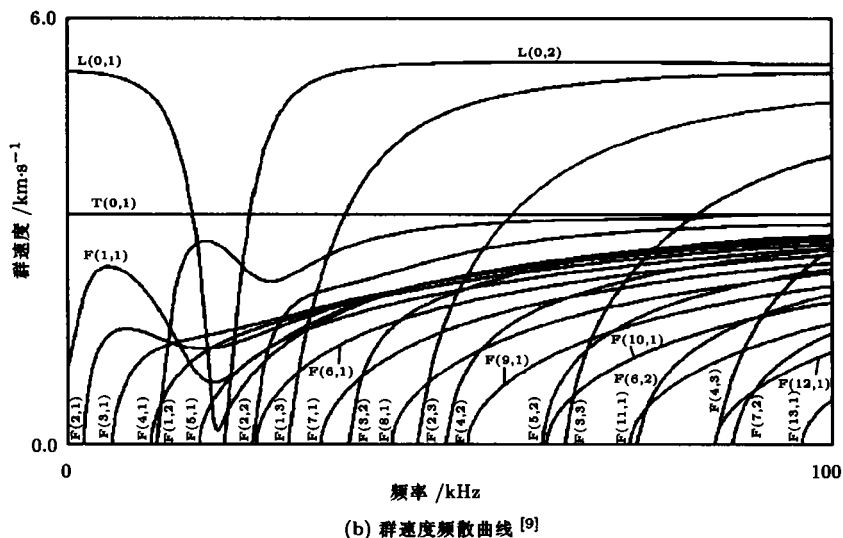


图 4 40# 钢管 (内径 76 mm, 壁厚 5.5 mm) 的频散曲线 [9] (续)

76 mm, 壁厚为 5.5 mm) 相速度和群速度的频散曲线 [9].

图 4 表明, 共有三族模式形式, 分别为纵向轴对称模式、扭转轴对称模式及非轴对称弯曲模式, 分别记为  $L(0, m)$ ,  $T(0, m)$  及  $F(n, m)$ . 即使在频率很低的范围内, 也会产生很多弯曲形模式.

图 5 是激励频率为 70 kHz 时, 不同模式的波在轴向和径向位移分量的分布形式 [9]. 不同模式、不同激发频率所产生的各位移分量存在很大差别.

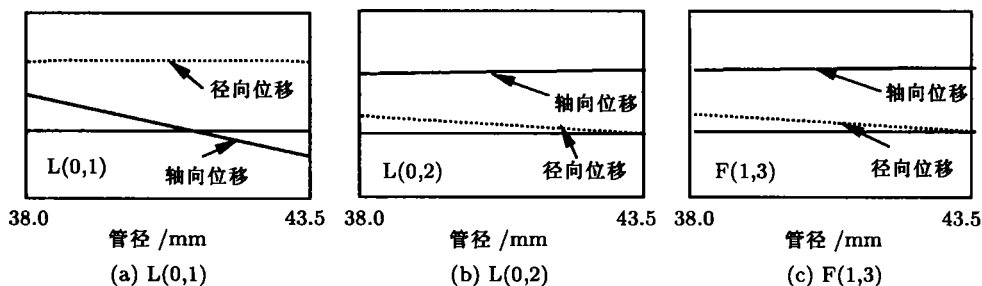


图 5 当激励频率为 70 kHz 时, 76 mm 钢管的位移形态 [9] (注: 纵坐标的位移幅度为任意单位)

### 3 导波模式及激励频率的选择

如上所述, 导波的频散特性和多模式特征使得对接收信号的处理变得困难. 这样, 选择合适的导波模式和激励频率就变得尤为重要. 在长距离无损检测中, 影响模式选择的两个主要因素, 一是它所能传播距离的能力; 另一个是它对缺陷的灵敏度. 为了使所获得的信号便于分析和处理, 通常总是希望激励单一模式、非频散的超声导波. 而其它模式在接收信号中的出现则可为缺陷的出现.

从群速度频散曲线图以及位移分布图可以看出, 轴对称  $L(0, 2)$  模式的导波由于下面四个特点具有很大的吸引力 [7,9,10]:

(1) 在相当宽的频带内 (40 ~ 100 kHz), 该模式是非频散的. 也就是说它的群速度随频率的变化甚微, 信号的形状 (即包络线) 和幅度都保持相对不变.

(2) 该导波模式是速度最快的模式. 因此任何其它模式均落后于此模式到达接收器, 易于在时域内区分感兴趣的信号.

(3) 轴向位移分量对于探测圆周向开口裂纹的灵敏度起决定作用. 该模式导波内外表面的轴向位移相对较大, 因此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.

(4) 该模式导波内外表面的径向位移相对较小, 这样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.

基于这四点, Alleyne et al.<sup>[14~17]</sup> 为了研究在管道中激励、接收导波, 多模式导波在管道中的传播、相长和相消, 导波与缺陷的相互作用等等, 在其测量系统中都选择了  $L(0, 2)$  模式. 由于在 70 kHz 处该模式波为非频散的 (或者说频散很小), 所以选择激励频率为 70 kHz. 采用被 Hanning (或 Gaussian) 窗调制的单音频脉冲激励导波,  $L(0, 2)$  模式在传播过程中波形的包络线基本不发生变化, 并且首先到达接收器. 同时, 通过采用不同数量的激励和接收传感器, 多模式波之间的相长和相消是非常明显的. 利用该模式导波研究与缺陷的相互作用, 获得了导波在缺陷处的反射和透射系数, 可以清晰地分别出人工缺陷的有无、位置和大小, 其结果是令人满意的. 这种窄带激励既可以提高信号强度, 又可以增加导波的传播距离.

通常, 在保证有足够的灵敏度的前提下, 应尽可能选择低的激励频率 (低频厚积). 这样接收信号中可能出现的模式数量会减小, 有助于信号分析.

若管道充有液体或管道被埋入地下, 管道的内外壁就与液体或固体相接触. 这就势必发生能量从管道到包围介质的泄漏. 对于外边界与液体接触的纵波模式, 每个振荡周期的能量泄漏为<sup>[10]</sup>

$$\langle P_r \rangle = -\frac{v_r^* T_{rr}}{2} \quad (3)$$

其中,  $v_r$  为管道外表面径向速度分量,  $T_{rr}$  为与液体接触面的法向应力分量,  $*$  为复共轭.

从以上公式可以看出, 质点的径向速度分量对于能量泄漏进而对波的幅度损失起着决定性作用. 如果  $v_r^+$  很小, 泄漏也很小. 从  $L(0, 2)$  模式的位移分布图可知, 其外表面的径向速度分量接近于零, 泄漏到外包围介质的能量也接近于零. 而内表面的径向速度分量也相对较小, 泄漏到内充液体的能量也较小.

然而, 对于非轴对称模式波的研究也是不可避免的. 因为从频散图中可以看出很多非轴对称模式与轴对称模式非常接近, 使得很难产生单一的对称模式. 另外, 非轴对称的缺陷也会产生非轴对称的反射. Shin et al.<sup>[18]</sup> 研究了利用非轴对称超声导波对缺陷进行快速、简便的检测. 他们利用偏载传感器装置, 在热蒸汽管道产生和接收非轴对称导波, 在不同的实验条件下 (改变发射探头和接收探头间的距离、改变探头的激励频率和探头的入射角等), 通过实验获得其超声场, 以此研究各非轴对称模式的相互干涉 (相长或相消). 其结果是轴向和周向的声场幅度都是非均匀的. 同时, 通过改变以上三个参数之一, 研究了不同轴向位置、不同圆周位置及不同大小的人工缺陷对导波的反射问题. 结果表明欲对管道进行 100% 的覆盖检测, 必须对这三个参数进行分别调节才可获得较好结果, 否则有可能漏检某些缺陷.

## 4 导波的激励与接收

### 4.1 板波的激励与接收<sup>[2,3,5,6]</sup>

最常用激励和接收板波的探头是基于一致性原理的楔形压电陶瓷探头. 一致性原理示意图如图 6 所示. 激发探头在耦合介质中产生波长为  $\lambda_c$  的标称平面波, 则在板中欲激励波的波长为  $\lambda_p = \frac{\lambda_c}{\sin \theta}$ . 这里  $\lambda_c = \frac{c}{f}$ ,  $\lambda_p = \frac{c_p}{f}$ .  $c$  和  $c_p$  分别为耦合介质的纵波速度和兰姆波的相速度,  $f$  为激发频率. 因此可以通过改变入射角来产生具有不同频率的兰姆波. 如要接收这一兰姆波, 接收探头, 类似于发射探头, 相对于板也要位于同一角度.

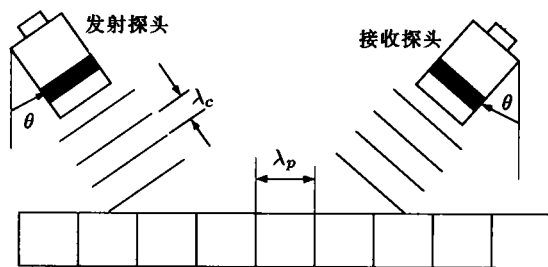


图 6 兰姆波激发和接收示意图

## 4.2 柱面导波的激励与接收

柱面导波的激励与接收方法主要有电磁式、脉冲激光式以及压电式等。

### 4.2.1 电磁式

EMATs(电磁声探头)已由许多研究者用于在管线中激励和接收柱面兰姆波<sup>[19~22]</sup>。EMATs的主要优点是它的非接触性,无需耦合剂,这在高温管道系统中的检测是非常重要的。同时EMATs在管道中既可以方便地产生纵向超声导波,又可以产生周向超声导波。但是,EMATs有其本质上的缺点。

(1) EMATs 需要强磁场来激励。这使得实验装置庞大笨重。尽管随着大功率的稀土永久磁铁的出现这一问题已有所减小。

(2) EMATs 探头与管道表面的间隙要求精确控制。此间隙稍有变大,其探测灵敏度急剧下降,甚至导致没有接收信号。

(3) EMATs 的输出通常比压电陶瓷探头的输出要小好多。

(4) 在现场实验中,通常是将 EMAT 探头与一个运动电机(称为爬机)相连接。在工作过程中,该爬机既要沿管线运动,又要绕轴线转动。在运动过程中探头与管壁距离必须保持不变,否则会导致测试数据丢失。而实际管道中的不规则部位,如凹凸处以及连接部位又是难免的。这给检测带来很大不便。

### 4.2.2 脉冲激光式

Addison et al.<sup>[23]</sup> 利用空间周期分布的脉冲激光源矩阵在平板中产生窄带、单模的兰姆波。Rose et al.<sup>[24]</sup> 进行了利用脉冲激光在管道中激励、利用锥形压电探头接收超声导波的实验研究。由于采用了内插式环状抛物线形铜反射镜,使得脉冲激光的能量经反射后沿圆周方向均匀分布,进而可容易地产生纵向轴对称的  $L(0, m)$  模式导波。在此基础上研究了人工缺陷的探测,得到了较为满意的结果。Addison et al.<sup>[25]</sup> 利用脉冲激光矩阵法激励柱面兰姆波,研究了兰姆波的激励和接收效率、模式的能量分布以及波的速度散射问题,给出了探测管道缺陷的初步实验结果。由于激光超声的非接触性,这一技术理应得到很好的研究,但由于这类装置的庞大、昂贵以及技术复杂,至今还没有得到广泛、深入的研究。

### 4.2.3 压电式

压电式探头以其方便、价廉、灵敏度较高、技术完善等特点被广泛使用。无论是体波、表面波,还是板波,利用压电陶瓷探头来激励和接收这些波是最常见的方法。同样,柱面导波也不例外。Ditri et al.<sup>[26]</sup> 研制了一套用于热交换管道检测的激励柱面导波的同心压电式探头。选择合适的圆锥角,由一致性原理激发和接收所需模式的波。Silk and Bainton 也采用了类似的思路。若管道的端部是可以接近的,则可使用标准的纵波探头,耦合到管的端部激励轴对称的  $L(0, m)$  模式波<sup>[27]</sup>。然而,这些方法采用的实验系统都是内插式(结构很复杂)或者是端部耦合式,这在实验室研究是可行的。但应用到实际中的管道检测,尤其是在线检测,如化工厂压力管道检测,

这种方法是不可可能的. 实际中可以将楔形探头安装在管道的外表面, 但这会使整个系统庞大笨重, 甚至不可能应用在管道的支架附近.

Alleyne et al.<sup>[14]</sup> 主要考虑了该技术的实用性, 要求探头系统在检测过程中易于安装也易于拆卸, 这一点是很重要的. 同时考虑到  $L(0, 2)$  模式是轴对称的, 其主要的应变分量是沿轴向的. 因此, 为了激励和接收  $L(0, 2)$  模式波, 他们选择了长度伸缩型的压电元件来有效地激励和接收  $L(0, 2)$  波. 选用长  $\times$  宽  $\times$  厚为  $12.5\text{ mm} \times 3.2\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$  的压电元件, 在上下表面镀以电极, 并使下表面的电极经过一侧端部延伸到上表面以便引线连接, 如图 7 所示.

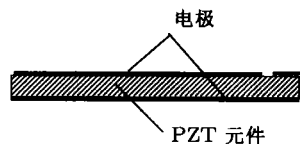


图 7 长度伸缩型压电元件示意图

由于  $T(0, m)$  模式是由管道的扭转变形所产生, 只能由圆周方向的运动来激励. 若将一片长度伸缩形压电元件沿管道轴向方向粘在管道外表面, 由于压电元件沿管道轴线方向伸缩, 理论上不会产生扭转模式. 又由于激励源的非对称性, 则将产生两种模式即  $L(0, m)$  和  $F(n, m)$ . 如果在圆周方向均匀布置一系列压电元件, 形成一个分离的压电环, 则可能抵消非对称的模式  $F(n, m)$ <sup>[14~17]</sup>. Alleyne et al.<sup>[14, 15]</sup> 指出: 当压电探头的个数大于信号频率范围内出现的最高模式次数时可以抑制非对称的模式  $F(n, m)$ . 例如, 他们研究的标称  $76\text{ mm}$  管, 在  $100\text{ kHz}$  内最高模式是 13, 采用 16 个压电探头得到了很好的结果. 然而, 采用了压电探头环仍可同时产生  $L(0, 1)$ ,  $L(0, 2)$  波. 若想只产生  $L(0, 2)$  模式, 使  $L(0, 1)$  模式尽可能地弱, Alleyne<sup>[28]</sup> 提出了两种方法, 一是采用间隔等于  $L(0, 1)$  模式波长的双发射环方法; 另一种是采用长度等于  $L(0, 1)$  模式波长的长度伸缩式压电元件. 因为在一个完整波长范围内的均匀激发将会抑制该模式. 同时, Alleyne<sup>[14]</sup> 详细地研究了探头耦合方式 (胶粘式和干耦合式)、激励和接收元件个数等对信号的影响. 其结果表明: 采用干耦合方式, 在压力适当情况下, 信号的幅度可达胶粘式的 90% 之高, 这说明干耦合方式由于其方便可拆, 在实际检测中是可行的. 而激励和接收探头采用大于最高模式的次数的压电元件环效果最佳. Alleyne et al.<sup>[15]</sup> 还建立了一套激励和接收单方向传播  $L(0, 2)$  模式波的实验系统.

## 5 导波与缺陷的相互作用

超声导波像其它体波一样遇到边界会发生反射、透射以及模式转换等现象. 实际中检测构件是否存在腐蚀、裂纹等缺陷, 就是检测由于缺陷的存在引起声阻抗的变化, 进而引起波的反射、透射等, 导致接收信号发生变化. 因此研究导波与缺陷的相互作用是探测缺陷的有无, 估价缺陷的大小、性质等的基础.

### 5.1 板波与缺陷的相互作用

板波与缺陷的相互作用类似于体波与缺陷的相互作用, 在实际检测中没有做过多的理论分析. 而 Alleyne et al.<sup>[5, 28]</sup> 采用有限元数值模拟和实验验证, 详细、系统地研究了板波与缺陷的相互作用, 实验与有限元二者结果吻合很好. 其结果说明, 在实验和数值模拟过程中使用二维快速傅立叶变换 (FFT) 方法可较好地定量分析板波与缺陷的相互作用. 板波对于人工缺陷的灵敏度取决于频厚积、模式形式 (对称或非对称)、模式阶次、缺陷的几何形状等. 当切槽宽度与波长相比较小时, 透射和反射波的幅度对切槽宽度不敏感.

### 5.2 柱面导波与缺陷的相互作用

柱面超声导波与缺陷的相互作用较板波要复杂很多. 对于柱面导波, 早在 70 年代末期, Silk 和 Bainton<sup>[27]</sup> 就已研究了人工缺陷与  $L(0, 1)$ ,  $L(0, 2)$  模式波的相互作用, 实验测得了明显的缺陷回波. 近年来 Moon Ho Park et al.<sup>[29]</sup> 实验研究了使用几种 Lamb 模式探测管道缺陷的可

性, 结果表明,  $a_0$  模式 (相当于  $L(0,1)$  模式) 对于缺陷的探测、准确定位最有效. John J. Ditre<sup>[30]</sup> 采用了  $S$  参数形式在理论上研究了弹性各向同性空心圆柱上周向裂纹对导波的散射问题. Alleyne et al.<sup>[16]</sup> 采用二种方法研究不同种类人工缺陷对柱面导波反射系数的影响. 一种是采用有限元方法数值模拟缺陷对轴对称  $L(0,2)$  导波的反射情况; 另一种方法是通过实验测得相同圆周尺度 (11%), 不同深度的人工缺陷和相同深度 (100%), 不同圆周尺度人工缺陷与导波反射系数的关系. 前者测量  $L(0,2)$  的反射, 后者既测量  $L(0,2)$ , 又测量  $F(1,3)$  的反射. 其结果表明: 反射系数与圆周尺度的关系非常接近于线性函数, 而反射系数与缺陷深度的关系也相当密切, 对于  $L(0,2)$  波, 仍接近于线性关系, 对于  $F(1,3)$  波则接近于半正弦状. 这里需要说明, 管道的人工缺陷 (切槽) 与实际腐蚀缺陷在几何形状上存在很大不同. 然而文献 [28] 的研究表明, 由于这两种缺陷的轴向尺寸都远比  $L(0,2)$  的波长 (约 80 mm) 小, 因此相同深度、相同圆周尺度的实际腐蚀缺陷和人工缺陷对  $L(0,2)$  的反射几乎相同. 文献 [31] 指出, 对于厚度切槽 (不切透, 即切槽深度小于厚度) 而言, 当切槽被打磨成类似于腐蚀缺陷的形状时  $L(0,2)$  的反射强度变化不大. 然而他们最近的研究表明,  $L(0,2)$  的反射对于部分深度的轴向尺寸比较灵敏, 而对部分圆周尺寸 (穿透) 不敏感. 另外, Alleyne et al.<sup>[15]</sup> 利用干耦合压电传感器产生柱面导波, 对化工厂的管道腐蚀进行了现场实验. 实验中,  $L(0,2)$  模式可成功地传播 50 m 以上. 同时研究了管道的焊缝、支撑以及法兰盘等处对  $L(0,2)$  模式波的反射问题, 以识别缺陷回波. 结果表明, 焊缝的回波幅度为入射波的 10% ~ 20%; 管道支撑 (未与管道焊接在一起) 对  $L(0,2)$  模式波的反射与焊缝相比很小; 但法兰盘处的反射回波很大. 因此不可能对法兰盘处的缺陷进行检测. 当管道弯曲半径大于管径 5 倍以上时, 管道的 90° 弯头不会引起  $L(0,2)$  模式波比较大的反射, 弯头两端焊缝处的反射回波可明显区别. 典型的缺陷回波如图 8 所示. 图 8(b) 中由于时间坐标较短,  $L(0,1)$  模式波型未显示出来.

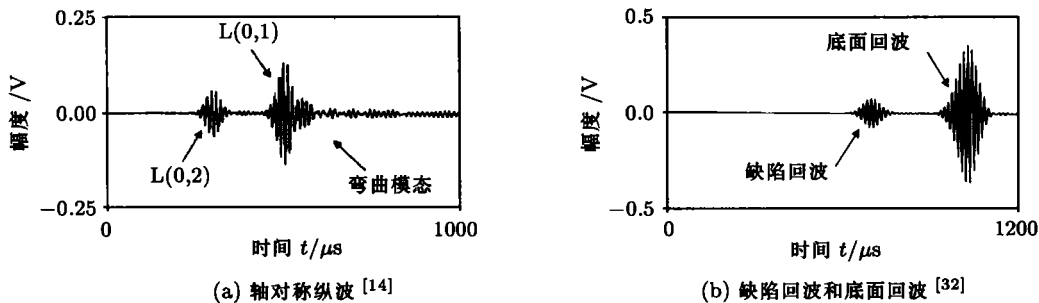


图 8 典型波形及缺陷回波

## 6 信号处理与特征提取

超声导波技术中的信号处理与特征提取方法未见有专门报导. 但和常规超声信号检测技术一样, 欲判断缺陷的有无, 定量确定缺陷的位置、大小、形状以及类型等, 其信号处理与特征提取方法是非常重要的. 主要方法有以下几种:

### 6.1 超声回波法

超声回波法<sup>[33]</sup> 是在时域内信号处理的最基本方法. 常规的超声波探伤检测技术, 如 A 型显示是根据超声反射回波中始波、底波、缺陷波的形状及其幅度大小, 并结合被检材料的加工情况、超声检测频率、波型、波束宽度以及不同缺陷的超声反射情况等加以分析判断. 就是说完全根据超声反射回波的时域信息进行缺陷定性. 探头的输出信号是在时域内被记录, 其横坐标是时间, 纵坐标是信号的幅度. 其他任何方法都是对时域信号做进一步较高级的分析与处理. 超声回波法主要缺点是可靠性不高.



## 6.2 超声频谱法

超声频谱法 (Ultrasonic Spectroscopy) 是由 R. Gericke 首先应用并获得专利的 [34]。超声频谱法的主要目的是为了提取一些在时域上很不明显的特征 [34,35]。因为不同性质及不同大小的缺陷对超声波的反射情况在本质上是不同的, 其反射回波之间存在许多差异。在许多场合这种差异在时域上表现不明显或很难检测出来, 而在频域上却较明显。通过对超声反射回波信号进行频谱变换 (或者利用模拟频谱仪, 或利用数字化的快速傅立叶变换), 再对其频谱结构进行分析即可对其特征做出判断, 即哪类缺陷影响超声频谱的哪些参数及形状。从而得到多于常规超声检测的有用信息。文献 [35] 采用超声频谱分析技术获得了缺陷回波的频谱信号, 然后利用非线性自动增长的自适应学习网络技术, 实现了对缺陷的自动鉴别, 对有尖锐边缘与平滑边缘的两类人工缺陷所做的定性分析与横孔直径的定量分析都获得了很好的结果。文献 [36] 对复合材料的各类人工缺陷, 利用超声频谱法提取其反射和透射回波, 再进行幅度谱、相位谱、功率谱、相关谱、自相关函数及互相关函数平方包络提取的分析, 获得了一些对不同预置杂质、缺陷的特征。超声频谱法充分利用了所测得信号的各种信息, 给出了反映缺陷性质的更多信息。

## 6.3 模糊模式识别方法

模糊模式识别就是借助于模糊集的概念来描述要识别的模式, 用模糊识别的方法对其进行识别、分类。要对不同缺陷进行模式识别, 首先必须建立每种缺陷模糊识别的物理模型, 并从该物理模型中提取其特征指标, 用以建立代表该缺陷的模糊数学模式, 即模糊子集。然后确定各种模糊识别方法并进行模糊运算, 以达到缺陷模糊识别的目的。文献 [37] 提出了用缺陷回波信号包络作为缺陷模糊识别模型并根据此模型建立缺陷模糊识别用的缺陷模糊子集, 给出了用实验方法建模的结果和缺陷模糊模式识别的应用实例。文献 [38] 提出并研究了管材超声探伤中缺陷模糊模式识别的物理模型、模糊模式的特征参数选择原则和方法, 建立了三种缺陷的标准模糊子集, 并运用模糊模式识别的数学方法对大量人工缺陷的实验数据进行了数值计算, 获得了预想的结果。

## 6.4 神经网络法

人工神经网络作为特征识别的一种有效手段, 毫无疑问可以用于缺陷特征, 如类型、大小、取向、性质等的识别, 而且可以避免目前常规无损检测设备的检测结果对检测人员的实际经验和操作技能的强烈依赖性。一般来说, 缺陷的出现并非随机任意的, 只要针对具体情况作出可能存在的各种缺陷模型, 测得超声回波数据, 对其进行预处理提取特征量, 利用它训练神经网络, 网络训练完成后此网络就可以用于对此类缺陷进行无损检测。将人工神经网络用于超声定量无损检测, 关键在于网络输入信号的选取, 即特征量的选取至关重要。目前比较常用的特征量有: 信号的幅度谱、相位谱、功率谱密度等。

将人工神经网络用于超声无损检测的研究工作始于 80 年代。随着神经网络理论和技术的不断完善以及计算机速度的迅速提高, 进入 90 年代, 应用人工神经网络进行缺陷识别成为无损检测领域中信号处理与特征识别的重要方法之一。Lorenz<sup>[39]</sup> 等利用人工神经网络成功地实现了钢板中缺陷的类型的定征。结果表明, 类型判别准确率达到 100%。McNab<sup>[40]</sup> 等利用自动超声无损检测设备对焊缝缺陷进行检测。选用一种计算方法, 计算出分别对应点状、线状、面状缺陷类型的特征量, 训练人工神经网络。训练后对未知缺陷进行识别, 类型识别率达 90%。另外, 利用小波变换的刻划信号局部特征的优越性, 探测正常信号中夹带的瞬态反常现象并展示其成分的应用也越来越多。

## 7 应用前景展望

超声柱面导波技术在无损检测领域中的应用前景广阔。相信随着导波技术在理论上的不断

深入, 实际技术的不断完善, 在不很长的时间内会得到广泛应用. 国外这种技术仍处在实验室进一步研究阶段. 尽管有一些现场 (化工厂压力管道) 实验的报导, 但也是在探索其可行性, 国内还未见报导. 可能应用的场合有:

### 7.1 管道无损检测 [41~43]

各种类型的管道, 如化工管道、石油管道、天然气管道以及自来水管等运行一定时期后会产生各种不同的缺陷, 如腐蚀、裂纹甚至开裂等. 对于这种应用场合, 快速大范围的超声导波检测技术有很大潜力. 首先有望应用在地面以上管道, 如化工管道. 导波在这些管道中传播时能量泄漏问题不突出. 而欲应用在地埋管道缺陷检测还有待进一步研究, 如选择模式、激励频率时要考虑衰减频散现象 (即衰减系数与频率的关系), 选择适当模式, 适当激励效率, 使得能量泄漏最小. 另外, 本文作者认为, 选择其他形式的激励源, 提高激励强度, 增大传播距离, 对于将这一技术用于工程检测具有特别意义.

### 7.2 后张力钢筋混凝土结构无损检测 [8,44]

在土木工程中, 后张力钢筋混凝土结构的应用越来越普遍, 尤其在桥梁结构中. 为防止预应力钢筋腐蚀, 在锚固后要对孔道进行压力灌浆, 且要密实均匀. 但灌浆部分的空洞缺陷是很难避免的. 当结构服役一定时间后, 常因水份、空气、或冬季路面撒盐融冰时的盐性液体等渗入孔穴内, 导致预应力高强钢筋 (钢棒或钢绞丝) 发生腐蚀. 由于预应力高强钢筋的工作应力大, 截面积小, 因此遭受腐蚀后的影响特别严重, 导致钢筋的强度下降很大. 在极限情况下会发生灾难性的倒塌事故. 基于此, 无损地检测这类腐蚀缺陷存在与否, 以及确定缺陷的具体位置等都具有很大的应用前景. 业已证明现有的检测方法都不完全满意, 特别是对于检测锚固附近部分更是困难, 而这一部分是最易发生腐蚀的地方. 在深入研究超声导波在实心圆柱体中传播理论的基础上, 利用导波技术直接检测这类被埋入钢棒 (或钢筋束) 部分以及估价其状况有很大潜力. 利用传统的脉冲回波技术探测缺陷对导波的反射回波即可确定缺陷的有无和位置. 不过这一问题就像埋入地下的管道一样, 导波的高衰减是主要困难.

### 7.3 岩石防护用岩栓的无损检测

在隧道、煤矿等开挖之后, 需将爆破后表面有松脱可能的岩层与内层深处未松弛而稳定的岩层以螺栓将其栓牢, 使其不发生崩塌. 其方法是将岩栓之锚杆插入内层稳定岩石并予以扣牢, 而在锚杆露出岩面一端以垫板销紧. 因而表层岩石一旦出现松脱现象时, 即因锚杆拉牢而不致脱落. 锚杆周围被水泥浆所包围, 起到保护岩栓免受腐蚀的作用. 通常岩栓的长度为 2~3 m, 直径为 10~30 mm. 这些岩栓在役过程中同样会出现类似前面所述的后张力钢筋混凝土结构中出现的问題. 并且岩栓的长度正好在超声导波最佳传播距离之内. 因此利用超声导波技术对这类问題进行检测同样前景看好.

### 7.4 其他方面

很显然, 以上介绍的导波技术都是在一维范围内的应用. 进一步对超声导波在二维体中的传播理论以及激励接收技术的研究, 有望将这一技术的应用范围扩大, 如大型压力容器、桥梁等结构的任意位置的缺陷检测. 相信, 随着无损检测界同行们的不断努力, 超声导波技术会得到越来越广泛的应用.

## 参 考 文 献

- 1 刘镇清. 超声无损检测中的导波技术. 无损检测, 1999, 21(8): 367~375
- 2 刘镇清. 无损检测中的超声兰姆波. 无损检测, 1999, 21(9): 409~413
- 3 徐可北. 金属薄板兰姆波检测技术. 无损检测, 1999, 21(10): 461~465
- 4 Rose J L. Recent advances in guided wave NDE. In: IEEE Ultrasonics Symposium, 1995. 761~770

- 5 Alleyne D N, Cawley P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. *J Acoust Soc Am*, 1991, 89(3): 1159~1168
- 6 Alleyne D N, Cawley P. Optimization of Lamb wave inspection techniques. *NDT&E International*, 1992, 25(1): 11~22
- 7 Rose J L, Krishna M Rajana, Frank T Carr. Ultrasonic guided wave inspection concepts for steam generator tubing. *Material Evaluation*, 1994, 26(2): 307~311
- 8 Pavlakovic B, Lowe M J S, Cawley P. The inspection of tendons in post-tensioned concrete using guided ultrasonic waves. *Insight*, 1999, 41(7): 446~452
- 9 Lowe M J S, Alleyne D N, Cawley P. Defect detection in pipes using guided waves. *Ultrasonics*, 1998, 36(2): 147~154
- 10 Rose J L, Ditri J J, Pilarski A, Rajana K M, Frank T Carr. A guided wave inspection technique for nuclear steam generator tubing. *NDT&E International*, 1994, 27(6): 307~310
- 11 Gazis D C. Three dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders I. Analytical Foundation. *J of the Acoustics Society of America*, 1959, 31(5): 568~573
- 12 Gazis D C. Three dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders II. Numerical Results. *J of the Acoustics Society of America*, 1959, 31(5): 573~578
- 13 Lowe M J S. Matrix techniques for modelling ultrasonic waves in multilayered media. *IEEE Trans Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1995, UFFC-42:525~542
- 14 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
- 15 Alleyne D N, Cawley P. Long range propagation of Lamb waves in chemical plant pipework. *Material Evaluation*, 1997, 53(4): 504~508
- 16 Alleyne D N, Lowe M J S, Cawley P. The reflection of guided waves for circumferential notches in pipes. *Journal of Applied Mechanics*, 1998, 65(9): 635~641
- 17 Alleyne D N, Lowe M J S, Cawley P. The inspection of chemical plant pipework using Lamb waves: Defect sensitivity and field experience. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1996, 15: 1859~1866
- 18 Hyeon Jae Shin, Rose J L. Guided wave tuning principles for defection in tubing. *J of Nondestructive Evaluation*, 1998, 17(1): 27~36
- 19 Bottger W, Schneider H, Weingarten W. Tube inspection with an EMAT using guided ultrasonic waves. In: Proceedings of the 4th European NDT Conference, vol.4, 1987. 2305~2313
- 20 Bottger W, Schneider H, Weingarten W. Prototype EMAT system for tube inspection with guided ultrasonic waves. *Nuclear Engineering and Design*, 1987, 102: 356~367
- 21 Duncumb U C, Keighley D M. Inspection of titanium tubing using ultrasonic Lamb waves generated by an electromagnetic acoustic transducer. In: Proc. 4th Eue NDT Conf, Vol. 4. Pergamon Press, 1987. 2228~2236
- 22 Thompson R B, Alers G A, Tennison M A. Application of direct electromagnetic Lamb wave generation to gas pipeline inspection. In: Proc IEEE Ultrasonic Symposium, Boston, Oct.4~7, 1972. 91~94
- 23 Addison R C, Jr, McKie A D W. Laser-based ultrasound arrays for generation and detection of narrowband, single mode Lamb waves. In: IEEE Ultrasonics Symposium, 1994. 1201~1204
- 24 Rose J L, Hongerholt D D, Sames J. Laser based, guided wave experiments for tubing. *Experimental Mechanics*, 1997, 37(2): 165~168
- 25 Addison R C Jr, Safaeinili A, McKie A D W. Laser-based ultrasound for the inspection of gas pipelines. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1997, 16: 1277~1281
- 26 Ditri J J, Rose J L, Pilarski A. Generation of guided waves in hollow cylinders by wedge and comb type transducers. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1993, 12: 211~218
- 27 Silk M G, Bainton K F. The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to Lamb waves. *Ultrasonics*, 1979, 17(1): 11~19
- 28 Alleyne D N, Cawley P. The interaction of Lamb waves with defects. *IEEE Trans UFFC*, 1992, 39(3): 381~397
- 29 Moon Ho Park, In Sup Kim and Young Ku Yoon. Ultrasonic inspection of long steel pipes using Lamb waves. *NDT&E International*, 1996, 29(1): 13~20
- 30 Ditri J J. Utilization of guided elastic waves for the characterization of circumferential cracks in hollow cylinders. *J Acoust Soc Am*, 1994, 96(6): 3769~3775
- 31 Alleyne D N, Cawley P. The effect of discontinuities on the long range propagation of Lamb waves in pipes. *J Process Mechanical Engineering, Proc I Mech E Part E*, 1996, 210: 217~226
- 32 Alleyne D N, Cawley P. The long range detection of corrosion in pipes using Lamb waves. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1995, 14: 2073~2080
- 33 J. 西拉德主编. 超声检测新技术. 北京: 科学出版社, 1991
- 34 Gericke O R. Ultrasonic Spectroscope. *US Patent*, 1970, Nov.10, No. 3538753
- 35 郝晓峰, 朱继洲, 翟兴耀. 超声频谱分析中应用自适应学习网络技术进行缺陷自动鉴别的研究. *应用声学*, 1992, 11(1): 17~21
- 36 胡建恺, 谢强等. 采用数字信号处理的复合材料超声谱分析. *应用声学*, 1996, 15(6): 11~15

- 37 吕干霖, 黎宗潼, 蔡杰. 超声检测缺陷模糊识别模型. 无损检测, 1996, 18(5): 121~124
- 38 陆俭伟, 吕干霖, 黎宗潼, 杨松章. 管材超声探伤中缺陷模糊模式识别方法研究. 声学学报, 1996, 21(1): 20~28
- 39 Lorenz M, Wielinga T S. Ultrasonic characterization of defect in steel using multi-SAFT imaging and neural networks. *NDT&E International*, 1993, 26(3): 127~133
- 40 Dr McNab U, Lain Dunlop. AI techniques applied to the classification of welding defects from automated NDT data. *British Journal of NDT*, 1991, 33(1): 11~18
- 41 Rose J L, Jiao D, Spanner J. Ultrasonic guided wave NDE for piping. *Material Evaluation*, 1996, 54(11): 1310~1313
- 42 Brook M V, Ngoc T D K, Eder J E. Ultrasonic inspection of steam generator tubing by cylindrical guided waves. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1990, 9: 243~249
- 43 Mohr W, Holler P. On inspection of thin walled tubes for transverse and longitudinal flaws by guided ultrasonic waves. *IEEE Trans Sonics Ultrasonics*, 1976, SU-23: 369~374
- 44 Duncan P J, Gaydecki P A. Ultrasonic NDT prototype for the inspection of ducted post stressing tendons in concrete beams. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1996, 15: 1799~1806
- 45 Ditri J J, Rose J L, Chen G. Mode selection criteria for defect detection optimization using Lamb waves. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1992, 11: 2109~2115
- 46 Rose J L, Ditri J J. Excitation of guided elastic wave modes in hollow cylinders by applied surface tractions. *J Appl Phys*, 1992, 72(7): 2589~2597
- 47 张善元, 杨桂通. 弹性动力学. 北京: 铁道出版社, 1989

## ADVANCES IN ULTRASONIC CYLINDRICAL GUIDED WAVES TECHNIQUES AND THEIR APPLICATIONS\*

He Cunfu      Wu Bin      Fan Jinwei

College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology, Beijing Polytechnic University,  
Beijing 100022, China

**Abstract** The recent research advances in ultrasonic cylindrical guided waves techniques and their applications in the field of NDT are briefly reviewed. An introduction on the concepts of guided waves and their characteristics is given. The choices of the modes of guided waves and exciting frequency, the methods of exciting and receiving guided waves, the interaction of guided waves with defects, the methods of signal processing and the possible applications in NDT are reviewed.

**Keywords** ultrasonic guided waves, frequency disperse, pipes, NDT

---

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (19972003), the National Natural Science Foundation of Beijing (3992006), etc.