

超声导波无损检测中的信号处理研究进展

吴 斌, 邓 菲, 何存富

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100022)

摘 要: 针对信号处理在超声导波检测正问题与逆问题中的不同作用, 对若干常用信号处理方法, 包括时频分析、小波变换、相关分析法等进行了综述; 对希尔伯特-黄变换等方法进行了介绍, 表明信号处理在提高信号的可读性、提高缺陷的检测与识别能力、表征被检对象的性能属性等方面具有重要作用。

关键词: 信号处理; 超声; 导波; 无损检测

中图分类号: TB 553

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2007)04-0342-07

超声无损检测是指在不损害材料或试件的情况下, 采用超声波技术对被检对象内部与表面进行探测。传统的超声检测方式在检测管道、平板及其他大型构件时, 都会存在耗时且设备复杂等问题。超声导波具有沿传播路径衰减小, 传播距离远, 引起的质点振动能遍及构件内部和表面的特点, 因此, 在管道、平板等大型构件的检测上能表现出更大的优势。目前, 超声导波无损检测的研究主要集中在导波传播机理、检测方法的选取和检测后信号的分析等方面。随着信息技术的发展, 在超声导波检测领域, 关于如何更好地对超声信号进行分析与解释, 如何从接收信号中提取有用信息的研究正受到广泛的关注。

在超声导波检测的研究中, 通常可以将问题分为: 正问题和逆问题^[1]。正问题是指选用适当的检测方法对被检对象进行理论和实验研究, 因此, 常常需要改善获取的实验信号, 提高信噪比, 增强可读性。逆问题则是指由检测信号反推得到被测对象的实际状况, 获得量化的检测结果, 例如: 结构体中几何参数、物理参数的确定以及缺陷的识别与定位、多层复合材料的无损评价等。

1 正问题中的信号分析

在正问题的研究中, 导波的多模态和频散特征是必须考虑的。在理想的导波检测中, 如果能激励单一模态、非频散的导波信号, 在接收到的回波信号中出现的其他模态就可被认为是由缺陷引起的。而实际检测中, 尽管依据导波频散曲线选择激励频率可以避免严重的频散现象, 但一般而言, 对于任何给定的频率至少会包含 2 种模态, 并且随着频厚积的增大, 模态还会更多, 因此, 有必要通过信号分析的方法区分接收信号中的 2 个甚至更多个模态。导波的频散是指导波中相速度随频率的不同而改变的现象会导致检测信号波包在结构中传播时发生展宽现象。当通过一定带宽的脉冲来激励特定模态的超声导波时, 其中包含的不同频率成分的超声波将以不同的速度传播, 使得信号的包络随传播距离的变化而变化, 并且峰值也将减小, 导致信号的提取与识别变得困难^[2]。

此外, 实验获取的超声检测信号可能受到多方面的干扰, 如被检对象本身结构中界面或边界形成的反射、实验环境引入的噪声等。这些干扰会影响甚至淹没检测中的有用信号, 使检测效果不理想, 因此, 信号分析是一种增强目标信号、去除噪声影响的辅助方法。从国内外大量的文献可知, 谱分析技术、时频分析法、小波变换、自适应滤波器和人工神经网络自适应滤波器等都具有去除噪声、检出特征的功能, 因此可以应用于导波检测信号的处理。目前这些研究均取得了不少进展, 其中, 时频分析法和小波变换的应用尤其受到大家的关注。

收稿日期: 2006-01-09。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10572009); 北京市自然科学基金资助项目(4052008, 8062008); 北京市教育委员会资助项目(KZ200510005004, KM200310005012)。

作者简介: 吴 斌(1962-), 男, 山西大同人, 教授, 博士生导师。

1.1 时频分析法

对超声回波信号进行简单的时域处理能获得缺陷位置、材料厚度、衰减等物理参量,用频域中相位谱方法和幅度谱方法也能测得相速度、共振频率、振动模式等信息,但单一的时域方法或频域方法只在单一模态或多模态传播,信号中不同模态的波包相互分开,并且只有在非频散的情况下检测结果才比较可靠。

导波检测信号是瞬态信号,有频散特性,同时受时间和频率的限制,具有典型的非平稳随机信号特征,而时频分析是瞬时频谱分析,是傅里叶分析的推广,所以,与传统的时域或频域分析方法相比,用时频分析方法处理可以获得更丰富、更准确的信息。

1.1.1 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换是目前应用最多的一种时频分析方法,它用一个形状光滑的窗函数 $w(t - \tau)$ 作用于信号后,再进行傅里叶变换,得到窗口中心和频率 ω 的二元函数^[3],即

$$T_{\text{STFT}}(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(t - \tau) e^{-j\omega t} dt$$

因此,通过选择合适的窗函数能适度地改善有限长余弦信号经傅里叶变换后产生的谱峰扩展和信号变形情况。

在导波检测中,短时傅里叶变换的滤波特性既可用于对检测信号去噪,也可用于多模态情况下的波包分离以及确定导波频散曲线等。超声导波的群速度频散曲线是在速度-频率空间上对超声导波不同模态能量传播特性的描述,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。基于此,Kwun 等在进行长距离充液管道导波频散特性研究时,利用短时傅里叶变换对信号进行时频分析,再与群速度频散曲线对比,判定了信号中存在的各导波模态(见图1)^[4]。郑祥明和 Marc 等在进行超声兰姆波时频分析时也证明了短时傅里叶变换在多模态分离上所发挥的作用^[5-6]。

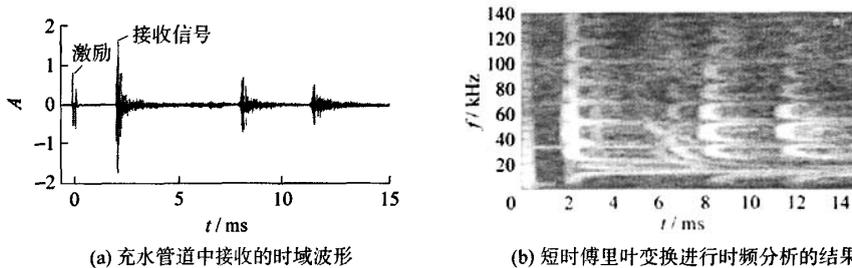


图1 短时傅里叶变换应用于充水管道导波频散特性研究

Fig. 1 Time domain waveforms and its time-frequency representation using STFT for pipe filled with water

1.1.2 伪魏格纳分布

魏格纳分布是另一种对信号的瞬时能谱进行描述的变换,它的最大优点是不受时间和频率测不准关系的限制,有利于克服短时傅里叶变换谱峰扩展、时频分辨率不高的缺点。由于魏格纳-维尔分布不是一个线性的变换,在反映信号能谱随时间变换的时候会出现负值和有害的交叉项,与实际能谱不吻合。为了改善这些问题,更好地分析局部时间段的频谱特征,将窗函数引入变换中,得到以 $w(\tau)$ 为窗的伪魏格纳分布^[3]

$$V_{\text{PW}}(t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \tau/2) \overline{x(t - \tau/2)} w(\tau) e^{-j\omega \tau} d\tau$$

文献[5-7]表明,在宽频带范围内,伪魏格纳分布可以将多个模态的散射波在时频空间中进行分离,并测量出多个模态波的速度,直接进行群速度频散曲线的定量测量。Prosser 等在研究中证明了时域超声信号的伪魏格纳分布与频散曲线能较好地吻合,且能区分其中的 A0、S0、A1、S1 模态^[7]。文献[5-6]中将时频重排的观点进一步引入分析过程中,对比了重排前后的情况,结果证明伪魏格纳分布能较好地反映信号能量的分布,但交叉项的存在仍使对应各模态频散曲线的能量分布在时间轴上拓展,能量强度与背景反差

不大.重排是对时频平面的能量分布进行重新分配,使信号分量的定位得到进一步细化,提高时频聚集性,并抑制部分交叉干扰.

1.1.3 Gabor 变换

具有非平稳特性的超声信号可以被看成是一系列短时平稳信号的叠加.对信号 $x(t)$ 施加一个滑动窗 $g(t-\tau)$ (τ 是移位因子,反映滑动窗的位置)后,再作傅里叶变换,即为 Gabor 变换^[8]

$$W(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)g(t-\tau)e^{-j\omega t} dt$$

建立在 Gabor 变换基础上的时频分析对窗函数的选择有较大依赖性,当窗函数的参数与超声信号的持续时间相匹配时,才可以获得最佳的时频集中效果,这种加窗的处理方法突显了它在时域和频域分辨率上的矛盾.文献[9]将 Gabor 变换用于估计柱状钢壳中轴对称纵波的第 1 阶和第 2 阶模态的群速度频散^[9].文献[10]采用以 Gabor 变换为基础的分离谱技术对材料的裂纹进行了检测^[10].

以上时频分析方法都采用了窗函数.通常,变化激烈的信号应用窄窗进行分析,以提高时间分辨力;变化缓慢的信号则宜用宽窗分析,以提高频率分辨力;所以,面对有的地方变化激烈、有的地方变化缓慢的非平稳的超声信号,只能通过多幅窗宽不同的能谱图共同描述,这是上述时频分析方法共同的不足点.

1.2 小波变换

以核函数 $\psi_{ar}(t)$ 对信号 $x(t)$ 作小波变换,定义为^[3]

$$W_{x,\psi}(a, \tau) = \langle x(t), \psi_{ar}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)} dt$$

这是一种时间-尺度分析.当小波尺度 a 变化时,分析窗口也随之变化(尺度越小,窗口越窄),这恰恰解决了上述时频分析中窗口宽度选择时的矛盾,实现了既在时域又在频域的高分辨局部定位,通过不断改变分析尺度将信号的突变、细节逐级放大.

小波滤波可以看作信号经过一组形状不变,但幅度、中心和带宽都随尺度的变化而改变的带通滤波器组作用后的无穷多个时间函数的集合,并且小波滤波器的形状可以针对具体任务通过不同的小波母函数来选择^[3],具有很大灵活性.

正是因为小波变换能根据所分析信号的频率自动改变时间和频率的分辨率及小波滤波器能自动根据信号的频率改变频带的宽度,决定了它在导波无损检测上有较好的应用.例如,Onsay 等将小波变换用于分析导波在频散介质中的传播情况^[11];Lin 等对钢管外表面含有轴向小裂纹的情况进行了导波环形传播的研究,用小波变换得到了缺陷深度与小波函数重要特性间的关系^[12];He 等将小波变换应用于模式声发射泄漏检测中的群速度测量和泄漏源定位^[13];Abbate 等将小波变换成功地用于表面波测量铬钢的弹性常数等^[14].焦敬品等通过分析声发射信号的 Gabor 小波变换幅度在时频空间的分布特点,证明了小波变换是分析频散波时频特性的有效工具^[15-16].励争等的研究则表明,以 Gabor 小波为母函数的连续小波变换,可以有效克服周向导波传播中的频散问题,提取出导波中各个频率分量的到达时刻和幅值^[17].Siqueira 等利用导波进行管中缺陷检测时,也采用多尺度小波变换进行去噪以提取缺陷回波信号^[18].在 Siqueira 等的实验中选用长 18.50 m、直径 1.52 m、厚 8 mm 的碳钢管作为试件,并模拟了无缺陷、4 mm 深裂缝、7 mm 深裂缝和 9 mm 深裂缝(已超过壁厚)的情况,图 2 所示即为用 5 尺度 db3 小波变换对 3 MHz 采样频率下获取的管道缺陷检测信号进行去噪的结果,信噪比提高了 12 dB.

小波变换比一般的时频分析方法有很大进步,但它仍然存在难以克服的缺点:1)小波基的选择非常复杂;2)小波基的有限长会造成信号能量的泄漏,因此,在分析非线性、非平稳的导波信号时会产生一些没有物理意义的虚假成分.

1.3 希尔伯特-黄变换(HHT)

希尔伯特-黄变换(HHT)是 Huang 等于 1998 年提出的,从本质上看,它也是一种时频域的信号分析方法.HHT 变换由 Huang 变换和 Hilbert 谱分析组成.其核心思想是将时间序列信号通过经验模态分解

成数个固有模态函数(IMF),然后利用 Hilbert 变换构造解析信号,得出原信号的瞬时频率和振幅,进而得到希尔伯特谱^[19]. HHT 变换的最大特点是它对信号进行的分解不是基于某一特定函数,这与其他时频分析方法(如傅里叶变换的三角函数、小波变换的小波基函数等)截然不同,并且每个固有模态函数都可以被看作是信号中的一个固有的振动模式,能表达信号的局部特征^[19].

HHT 变换在海洋波动数据分析、地震信号分析、结构健康监测等领域已经受到广泛关注,但在导波无损检测上的应用还很少见.孟涛在研究铅芯在钢板上折断产生的声发射信号时采用了 HHT 变换^[20],验证了声发射信号中主要含有 A0、S0 导波模态,且信号能量组成以 A0 模态导波为主,S0 模态导波相对较少,与薄板结构的理论群速度曲线基本一致.

2 逆问题中的信号分析

在逆问题中,实现缺陷的定量评价是工业应用中亟待解决的问题,成为近来研究的热点.在进行缺陷的定量评价时,首先利用解卷积使获得的回波信号只与被测缺陷有关.解卷积的方法很多,有 Wiener 滤波法解卷积、高阶谱解卷积、Born 近似法解卷积、Hartley 变换解卷积、自适应滤波解卷积以及小波变换解卷积等.在获取了与其他因素相联较少的缺陷回波信号后,应根据信号的各种特征确定缺陷的量化指标.由于实际可能出现的缺陷形状比较复杂,一般人们将缺陷按几何特征进行简单归类,寻找可表示它们的典型特征,再根据这些特征进行缺陷的辨识.这些典型特征的选取可以具有多元性,既包括从时域直接读取的时间间隔、峰峰值,也包括从频域得到的相位谱、幅度谱中的信息以及相关函数、分形特征等.

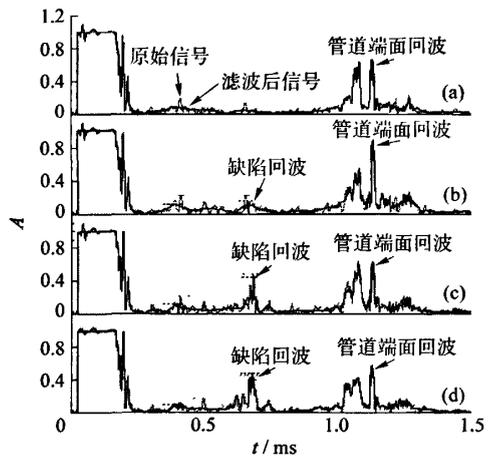
2.1 相关分析的应用

在测试技术领域,相关分析可用于分析 2 个信号或 1 个信号在时移前后之间的关系^[8].均值、方差、概率密度函数等只能反映信号幅值的统计特性,而相关函数则可以更深入地解释信号波形之间的关联程度.一般自相关函数表示随机样本信号 $x(t)$ 与此样本信号经平移 τ 后的信号 $x(t+\tau)$ 之间的关系,主要用来提取随机信号中的确定性信息.互相关函数则是 2 个随机样本信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 间的作用,不仅可以提取随机信号中的周期信息,还可提取非周期信息,因此可以利用它来解决传播问题以及提取被噪声淹没的信号.

相关分析的上述特点,决定了它在缺陷的识别和定位这类逆问题的研究中可以发挥较好的作用.以板中导波缺陷识别来说,研究者可以分别模拟不同缺陷类型,包括裂缝、槽、焊点等,将测得的导波信号作为缺陷识别的参考信号,在检测未知缺陷时,根据检测信号与各参考信号间的相关性不同(同类缺陷的信号相关性强于不同类信号)进行缺陷类型的判别,当然,这样的检测会受到实验环境和装置的较大影响,在分析时应予以足够的考虑.Young 等进行了类似的研究,在实验室环境中实现了裂缝、槽、焊点以及多种缺陷共存的有效辨识^[21].Daewon 在研究中也用这样的方法对裂纹和沉淀进行了分辨^[22].另外,Stephen 等也利用移动超声探头获得的缺陷检测信号之间的相关性与探头几何位置之间的关系,反推了飞行器表面缺陷的位置^[23].

2.2 模糊模式识别和神经网络的应用

模糊模式识别是指借助于模糊集的概念描述要识别的模式,并对要识别对象进行辨识和分类.模糊



(a) 无缺陷; (b) 4 mm 深缺陷; (c) 7 mm 深缺陷; (d) 9 mm 深缺陷

图2 导波管道缺陷检测时用 5 尺度小波变换去噪^[18]

Fig.2 Denosed signals using wavelet decomposition at 5 levels for pipe inspection

模式识别方法大致可分为直接法与间接法2种.将模糊模式识别运用于缺陷检测时,主要是解决一个聚类的问题.各种缺陷(包括已知缺陷与未知缺陷)的模糊子集的建立以及特征提取是模式识别成功的关键.目前在导波无损检测领域,模糊模式识别的应用主要集中在2方面:1)管材、板材等典型结构的探伤中缺陷模糊模式识别以及模糊聚类识别方法的研究;2)采用模糊聚类分析方法,对复合材料进行高灵敏度的缺陷检测和特性鉴定.

神经网络也是模式识别的重要方法之一,目前导波无损检测中,神经网络的训练算法一般采用较成熟的BP算法,即误差信号反向传播算法.神经网络在超声无损检测中的应用,主要包括:以功率谱密度为特征量,利用神经网络实现复合材料中缺陷类型的识别;利用去卷积幅度谱作为特征量训练神经网络,实现对横穿孔、平底孔及裂缝等缺陷类型的识别;设计与研制基于神经网络缺陷识别的智能超声检测系统.另外,除了定性与定量分析外,还可将神经网络运用在自适应滤波器上,实现强噪声影响下的缺陷回波识别等.Chen、刘镇清和弓乐等在他们的研究中都曾采用神经网络的方法对不同的缺陷进行分类^[24-26].图3所示为Sylvie等在利用超声兰姆波对焊点进行无损评估时所采用的信号分析流程^[27].他们利用小波分析的方法提取时域超声信号的特征,然后在获得的大量样本的基础上,利用神经网络对焊点进行分类.这是一种比较典型的分析思路,在Solis等的研究中也采用^[28].

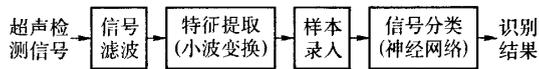


图3 焊点评估的信号分析流程图

Fig.3 Signal processing for weld joint evaluation

除了上述几种方法外,基于误差函数的分析方法也经常运用于导波无损检测的逆问题研究中,例如:刘镇清等利用多模式兰姆波速度测量建立了一种基于误差函数的三层板参数反演算法^[29];明廷锋等则在概率统计理论的基础上,建立了超声背散射回波信号幅度概率分布密度的数学模型,在此基础上实现了被测颗粒尺寸的反演^[30].另外,动力学是导波无损检测中缺陷识别的基础,所以,Born近似法、Kirchhoff法、传递矩阵法等一些经典的线性化反演方法在缺陷识别中也有一些较好应用.

3 结论

随着导波检测研究的不断深入,人们的研究视角从最初的机理研究转到定性缺陷检测,现在人们更加关注的是如何从检测信号中获取更多关于缺陷的信息,因此,更多的信号分析方法将被引入这个领域,并且与其他学科(例如图像处理、通信等)的交融也将更加深入.本文仅对其中若干常用方法及其研究现状作了简单综述,并得出以下结论:

1) 在正问题的研究中,由于各种时频分析方法都能在时频平面上对导波信号进行近似的能谱描述,因此,在确定导波频散曲线、实现多模态波包分离时得到较多应用.通过对变换的结果进行重排,可以进一步提高时频聚集性,但仍无法克服窗宽确定带来的不足.

2) 小波变换的多尺度分析,能实现既在时域又在频域将信号的突变、细节逐级放大.导波检测过程中不可避免的多模态问题以及缺陷带来的模态转换问题都发生在一个较窄的频带内,因此用小波变换实现对不同模态波包的分离会得到更优的效果.

3) 目前在逆问题的研究中,常用的信号分析方法多用于对检测目标进行定性评估,如缺陷类型、形状的辨识等,有关定量评估的方法将成为未来研究的热点.

4) 一个完整的信号分析过程,可能同时包含多种信号分析方法,例如:在智能缺陷识别过程中,可以同时用到滤波器去噪、用小波变换提取特征信息、用神经网络进行缺陷的辨识等^[31].

参考文献:

- [1] 刘骁,刘镇清.超声无损检测中逆问题的研究[J].无损检测,2001,23(10):441-443.

- LIU Xiao, LIU Zhen-qing. Research on inverse problems in ultrasonic nondestructive testing[J]. *Nondestructive Testing*, 2001, 23(10): 441-443. (in Chinese)
- [2] 何存富, 吴斌, 范晋伟. 超声柱面导波技术及其应用研究进展[J]. *力学进展*, 2001, 31(2): 203-214.
HE Cun-fu, WU Bin, FAN Jin-wei. Advances in ultrasonic cylindrical guided waves techniques and their applications[J]. *Advances in Mechanics*, 2001, 31(2): 203-214. (in Chinese)
- [3] 罗转翼, 程桂芬. 随机信号处理与控制基础[M]. 第1版. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [4] KWUN H, KEITH A B, DYNES C. Dispersion of longitudinal waves propagating in liquid-filled cylindrical shells[J]. *Acoustical Society of America*, 1999, 105(5): 2601-2611.
- [5] 郑祥明, 顾向华, 史立丰, 等. 超声兰姆波的时频分析[J]. *声学学报*, 2003, 28(4): 368-374.
ZHENG Xiang-ming, GU Xiang-hua, SHI Li-feng, et al. Time-frequency analysis of Lamb waves[J]. *ACTA Acustica*, 2003, 28(4): 368-374. (in Chinese)
- [6] MARC N, LAURENCE J J, QU Jian-min, et al. Time-frequency representation of Lamb waves[J]. *Acoustical Society of America*, 2001, 109(5): 1841-1847.
- [7] PROSSER W H, MICHAEL D S, SMITH B T. Time-frequency analysis of the dispersion of Lamb modes[J]. *Acoustical Society of America*, 1999, 105(5): 2669-2676.
- [8] 范云霄, 刘桦. 测试技术与信号处理[M]. 第2版. 北京: 中国计量出版社, 2002.
- [9] BARTELS K A, KWUN H, HANLEY J. Analysis of wave dispersion with applications to magnetostrictive sensing[C]// *ASNT 1996 Spring Conference/Fifth Annual Research Symposium*. Houston: ASNT, 1996: 80-82.
- [10] BILGUTAY N M, SANIIE J. The effect of grain size on flaw visibility enhancement using split-spectrum processing[J]. *Mater Eval*, 1984, 42(6): 808-814.
- [11] ONSAY T, HADDOW A G. Wavelet transform analysis of transient wave propagation in a dispersive medium[J]. *Acoustical Society of America*, 1994, 95(3): 1441-1449.
- [12] LIN S, ITO T, KAWASHIMA K. Sizing of axial defects in pipes with FEM simulation of wavepropagation and wavelet transformation[C]// *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium'98*. New York: IEEE, 1998: 877-880.
- [13] HE Cun-fu, JIAO Jing-pin, WU Bin, et al. The modal acoustic emission source location technique in pipeline using the wavelet transform of dispersive waves[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2004, 30(9): 96-101.
- [14] ABBATE A, KOAY J. Signal detection and noise suppression using a wavelet transform signal processor: application to ultrasonic flaw detection[J]. *IEEE Transaction on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1997, 44(1): 14-25.
- [15] 焦敬品, 吴斌, 何存富, 等. 基于模态声发射和小波变换的薄板中导波传播特性的实验研究[J]. *中国机械工程*, 2004, 15(13): 1179-1182.
JIAO Jing-pin, WU Bin, HE Cun-fu, et al. Experimental research on guided waves propagation in thin plate using wavelet transform and mode acoustic emission[J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, 15(13): 1179-1182. (in Chinese)
- [16] 焦敬品. 管道泄漏模态声发射检测技术研究[D]. 北京: 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 2004.
JIAO Jing-pin. The research of modal acoustic emission in pipeline leak detection[D]. Beijing: College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [17] 励争, 夏书满, 王君. 薄壁管道内部径向裂纹的检测[J]. *机械强度*, 2004, 26(6): 642-646.
LI Zheng, XIA Shu-man, WANG Jun. Detection of the radial crack in a thin-walled tube[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2004, 26(6): 642-646. (in Chinese)
- [18] SIQUEIRA M H S, GATTS C E N, SILVA R R, et al. The use of ultrasonic guided waves and wavelets analysis in pipe inspection[J]. *Ultrasonic*, 2004, 41: 785-797.
- [19] 公茂盛, 谢礼立. HHT方法在地震工程中的应用之初步探讨[J]. *世界地震工程*, 2003, 19(3): 39-43.
GONG Mao-sheng, XIE Li-li. Discussion on the application of HHT method to earthquake engineering[J]. *World Earthquake Engineering*, 2003, 19(3): 39-43. (in Chinese)
- [20] 孟涛. 基于模态声发射的埋地管道泄漏声信号传播特性研究[D]. 北京: 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 2005.
MENG Tao. Research on propagation characteristics of leak signals in buried pipeline based on mac[D]. Beijing: College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, 2005. (in Chinese)

- [21] YOUNG H K, SUNG J S, JUN Y K. A new technique for the identification of ultrasonic flaw signals using deconvolution[J]. *Ultrasonic*, 2004, 41: 799-804.
- [22] DAEWON K. Classification of ultrasonic NDE signals using the LMS algorithm and synthetic aperture focusing technique[C]//IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement systems and Applications. Puerto Rico; IEEE CS Press, 2005: 175-180.
- [23] STEPHEN D H, RON R, CHIMENTI D E, et al. Two-sensor ultrasonic spacecraft leak detection using structure-borne noise[J]. *Acoustical Society of America*, 2005, 6(2): 63-68.
- [24] CHEN C H, LEE G G. Neural network for ultrasonic NDE signal classification using time-frequency analysis[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. New York: IEEE, 1993: 1493-1496.
- [25] 刘镇清. 一种改进的人工神经网络学习算法及其在超声检测中的应用[J]. *声学技术*, 2000, 19(4): 179-181.
LIU Zhen-qing. An improved learning algorithm for artificial neural network and its application in ultrasonic testing[J]. *Technical Acoustics*, 2000, 19(4): 179-181. (in Chinese)
- [26] 弓乐, 吴淼. 基于 LabVIEW 和神经网络的超声检测缺陷分类的研究[DB/OL]. [2005-02-24]. <http://www.paper.edu.cn>.
GONG Yue, WU Miao. Study on flaw classification in ultrasonic testing based on neural network and LabVIEW program[DB/OL]. [2005-02-24]. <http://www.paper.edu.cn>. (in Chinese)
- [27] SYLVIE L, DANIEL M. Neural classification of lamb wave ultrasonic weld testing signals using wavelet coefficients[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, 50(3): 672-678.
- [28] SOLIS M, BENITIZ H. Location of material flaws using wavelet analysis and neural network[C]//IEEE Ultrasonic Symposium. New York: IEEE, 2002: 841-844.
- [29] 刘镇清, 刘骁, 他得安. 用斜探头激发的兰姆波对三层板参数进行反演测试研究[J]. *声学学报*, 2002, 27(5): 408-412.
LIU Zhen-qing, LIU Xiao, TA De-an. Inverse determinations of the parameters of three-layered plate using angle probe generated Lamb waves[J]. *ACTA Acoustica*, 2002, 27(5): 408-412. (in Chinese)
- [30] 明廷锋, 朴甲哲, 张永祥. 基于超声波测量技术的颗粒尺寸分布模型的研究[J]. *应用声学*, 2005, 24(2): 103-107.
MING Ting-feng, PIAO Jia-zhe, ZHANG Yong-xiang. A model of particle size distribution based on ultrasonic measuring technology[J]. *Applied Acoustics*, 2005, 24(2): 103-107. (in Chinese)
- [31] 谈文心, 张新春. 便携式智能超声无损检测系统的研究[J]. *无损检测*, 1997, 19(7): 181-185.
TAN Wen-xin, ZHANG Xin-chun. A research on portable intelligent ultrasonic nondestructive testing system[J]. *Nondestructive Testing*, 1997, 19(7): 181-185. (in Chinese)

Review of Signal Processing in Ultrasonic Guided Waves Nondestructive Testing

WU Bin, DENG Fei, HE Cun-fu

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

Abstract: Modern signal processing has been playing an more important role in ultrasonic guided waves of nondestructive testing and evaluation. To demonstrate how to improve the readability of guided waves signal and enhance the ability of deflection identification, a review and comparisons of some methods including time-frequency representations, wavelet analysis, Hilbert-Huang transforms, and cross-correlation techniques and so on have been carried out.

Key words: signal processing; ultrasonic; guided waves; nondestructive testing