

文章编号:1001-4888(2005)04-0584-05

基于小波变换及 Wigner-Ville 变换方法的超声导波信号分析^{*}

何存富, 李 颖, 王秀彦, 吴 斌, 李隆涛

(北京工业大学 机电学院, 北京 100022)

摘要: 对结构中缺陷的检测和识别是无损检测中的一项重要研究课题, 超声导波由于可在短时间内检测很远距离, 故它的一个重要应用便是管材的检测。因而对导波检测信号的处理成为一个重要研究内容, 本文利用时一频分析方法中的小波变换和 Wigner-Ville 变换对管道和抽油杆缺陷的导波检测信号进行了分析处理。实验结果表明, 进行小波变换后, 缺陷回波信号的信噪比大大提高, 直径仅 1mm 的小孔缺陷可容易地被识别出来, 准确检测出其位置; 通过对信号进行 Wigner-Ville 的相关变换, 可同时在时频两域内对缺陷的回波信号进行分析, 使缺陷辨别起来简单易行。两种信号处理方法的超声导波应用研究为以后导波信号的处理提供了新的实现依据。

关键词: 无损检测; 导波; 抽油杆; 小波; Wigner-Ville 变换

中图分类号: O348 **文献标识码:** A

1 引言

在无损检测领域, 导波方法和其它一些类似方法, 例如声发射和振动分析等, 已受到普遍关注。这主要是由于它们具有可传播很远距离而无大衰减的能力。而对于现代工业, 尤其是需要可靠和低耗费检测方法的石油化工工业来说是很重要的。目前, 在管道、化工厂、热交换管、储油罐检测等方面导波检测均已取得了很好的效果。

超声波在圆柱和圆柱壳中传播时由于波形的耦合而形成导波, 导波在整个试件内都有质点的振动, 声场遍及试件的整个壁厚^[1,2]。导波有几种不同的传播模态, 不同模式导波的产生主要依赖于几个因素, 例如加载系统, 入射角度, 传感器中心频率, 激励信号频带宽度等, 纯粹单一模态的导波很难产生^[3], 而且导波在遇到缺陷或结构端面时还会发生波形转换, 这就使接收到的信号波形复杂, 缺陷识别变得困难。因而在超声无损检测中, 将淹没在噪声信号中的缺陷回波精确的检测出来是一个很重要的问题。为了减少缺陷回波中的噪声, 研究者们提出了很多信号处理的方法, 如短时 Fourier 变换, 二维快速 Fourier 变换, 小波变换, Wigner-Ville 变换等。

在本文中, 主要对时一频分析方法中的小波变换和 Wigner-Ville 变换用于导波检测的情况进行了描述, 并对管道与空心抽油杆缺陷检测的应用举例进行分析。

2 信号处理方法

2.1 小波变换及其在导波检测中的应用

* 收稿日期: 2005-01-24; 修订日期: 2005-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(19972003, 10272007)、北京市自然科学基金(3011001)、北京市自然科学基金(3992006)、北京市优秀人才培养专项经费资助项

通讯作者: 何存富(1958—), 男, 北京工业大学教授, 博士生导师, 主要从事机电系统健康监测、智能测试技术及信号处理以及无损检测与评价技术等方面的研究。

小波变换形象地说,就是将信号用不同大小尺寸的函数窗(如图 1a 所示)进行处理^[3],当信号在低频时用宽窗,在高频时用窄窗。即对每一分析频率,小波变换可解释为用中心频率为 f 的带通滤波器对信号进行滤波的结果。对于一接收信号 $x(t)$,它的连续小波变换可表示为:

$$\text{WT}(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) g_{a,b}^*(t) dt \quad (1)$$

上式中的上标 * 代表取共轭, $g(t)$ 称为母小波, $g_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} g\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为对其进行平移和伸缩所得到的一函数族,称为子小波(基),其中 a 为尺度因子,且 $a>0$,由它来控制母小波作伸缩变化, b 为平移因子,由其控制小波的平移。

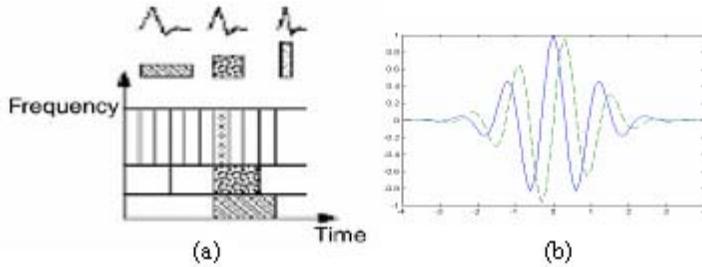


图 1 a) 不同 a 值下的小波基本分析单元和 b) Morlet 小波函数

Fig. 1 a) Signal analysis utilizing variable size windows(wavelet transform) and b) Morlet wavelet function

本文中采用 Morlet 小波作为母小波,该小波是高斯包络下的单频率复正弦函数,其虚部是实部的希尔伯特变换,故本文中所用小波变换确切地说应是解析小波变换,其波形如图 1b 所示,图中实线代表小波函数的实部,虚线代表其虚部。Morlet 小波的定义为^[4]:

$$\varphi(t) = \exp(-t^2/2)\exp(j\omega_0 t) \quad (2)$$

$$\Psi(\omega) = \sqrt{2\pi}e^{-(\omega-\omega_0)^2/2} \quad (3)$$

该小波的时、频两域的局部性能都比较好,尽管严格地说它并不是有限支撑的,也不满足容许条件,但在实际应用中只要取 $\omega_0 \geqslant 5$ 便可近似满足条件。另外,在本文中,为了使小波变换的效果更好,尽量减少干扰信号的影响作用,首先选择 ChebyshevI 型带通滤波器对采集信号进行滤波。

按照数字信号处理的习惯通过计算机作近似数值计算,在(1)式中取 $t=nt_s$, $n=0 \sim N-1$; $b=kt_s$, $k=0 \sim N-1$,其中 t_s 为采样间隔, N 为采样点数。则得到离散化的小波变换形式:

$$\text{WT} = \frac{t_s}{\sqrt{a}} \sum_{n=0}^{N-1} g_{a,b}^*\left(\frac{n-k}{a}\right) x(n) \quad (4)$$

当然,计算时 a 也必须离散取值,一般取 $a=2^m$, m 为整数。则上式变为:

$$\text{WT} = \frac{t_s}{\sqrt{2^m}} \sum_{n=0}^{N-1} g_{a,b}^*\left(\frac{n-k}{2^m}\right) x(n) \quad (5)$$

不考虑主脉冲及端面反射回波的影响,通过分析小波变换后的信号峰值,就可以确定管道和空心抽油杆中缺陷的位置。

2.2 Wigner-Ville 变换方法

Wigner-Ville 变换^[5,6]是时一频分析方法中的另一信号处理方法。它属于 Cohen 类分布中的一种,是一种二次型时频表示方法,它将一维信号映射到二维时间一频率域,能够反映信号能量在时间一频率域上的分布。它比 Cohen 类分布中的其它分布具有更好的时一频聚集性。

对于一接收信号 $x(t)$,它的 Wigner-Ville 变换可定义为^[5]:

$$\text{WVT}_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x_a\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x_a^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{-j2\pi f\tau} \cdot d\tau \quad (6)$$

式中 * 代表取复共轭, τ 为时间变量, $x_a(t)$ 是实信号 $x(t)$ 的解析信号,若式中直接使用实信号 $x(t)$,则上式给出的时频分布就是 Wigne 分布,但它很少使用。在上面的分布中采用解析信号而不使用实信号

的优点是:(1) 使用解析信号不需要过采样,且可避免不必要的畸变影响,而对于实信号而言过采样是必需的。(2) 解析信号只保留了实信号的两倍正频部分,因而可以避免使用实信号时由于正负频之间存在的交叉项。

为获得实信号的解析信号,首先可将信号 $x(t)$ 离散化,取 $t = nt_s$, $n=0 \sim N-1$, 可得离散化的信号 x_n , 进行 FFT 变换得到其频域形式 $x(\omega)$, 重新取构造函数:

$$s(\omega) = \begin{cases} \chi(\omega), & \omega = 0 \\ 2\chi(\omega), & \omega = 1 \sim N/2 - 1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

对上式取 IFFT 就可得到所要求的解析信号,将所求解析信号代入(6)式就是所说的 Wigner-Ville 变换。实际中更常用的是加窗 Wigner-Ville 分布或称伪 Wigner-Ville 分布,以适于分析有限长信号并降低旁瓣。

Wigner-Ville 变换是双线性时频分布,交叉项是二次型或双线型时频分布的固有结果,它们来自多分量信号中不同信号分量之间的交叉作用,它是时频分布里的干扰产物,它们在时频域表现出与原信号的物理性质相矛盾的结果,也就是说,在信号 $x(t)$ 的时频平面上本不该出现信号的地方,却表示有信号出现。在有些信号的变换中,如果对交叉项不加以控制,Wigner-Ville 变换将会退化成传统的谱分析方法,但实验证明只要简单的把 Wigner-Ville 变换后的所有负的分量置零就可有效的抑制交叉项,因为在 Wigner-Ville 变换中只有交叉项才有可能是负值。将去掉负分量后的 Wigner-Ville 变换沿时间轴积分就可得到 Wigner-Ville 变换的能量谱。

3 实验结果及分析

3.1 实验装置

基于超声导波的管道或空心抽油杆缺陷检测装置如图 2 所示。利用此装置进行管道或抽油杆的缺陷检测首先是要对激励信号进行优化,在此选择经汉宁窗调制的十周期的正弦信号作为激励信号。将此信号通过 RS232 串口通信从任意波形发生器输入到功率放大器进行信号的放大后,峰峰值可达 150V。放大后的信号经转换开关就可作用在传感器上激励超声导波。传感器利用自行设计的中心频率为 0.5MHz 的环形传感器(如图 3 所示),该传感器同时作为激励和接受传感器。激励导波模态优选轴对称的 $L(0,2)$ 模态。传感器接受的信号经前置放大器放大后被采集到数字示波器和计算机。

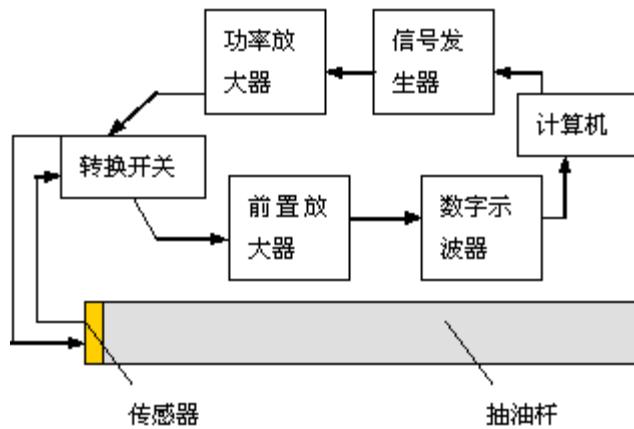


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up



图 3 环形传感器

Fig. 3 Cricoid transducer

在实验中首先选取一根长为 2534mm, 外径为 $\phi 70\text{mm}$, 壁厚 3.5mm 的管道作为研究对象, 在距离放置传感器端 1500mm 处有一直径为 1mm 的通孔。另外实验中还选择内半径 31.43mm, 壁厚 5.5mm, 长 3080mm 的空心抽油杆进行研究, 其与管材不同之处就在于它有一尾部阶梯, 但抽油杆仍可近似看

做管材。距离抽油杆尾部阶梯 888mm 处有一周向直槽,宽为 1mm,深为 1mm,另外在该直槽和抽油杆尾部阶梯之间距该槽 250mm 处另有一直槽,宽为 1mm,深为 0.5mm。

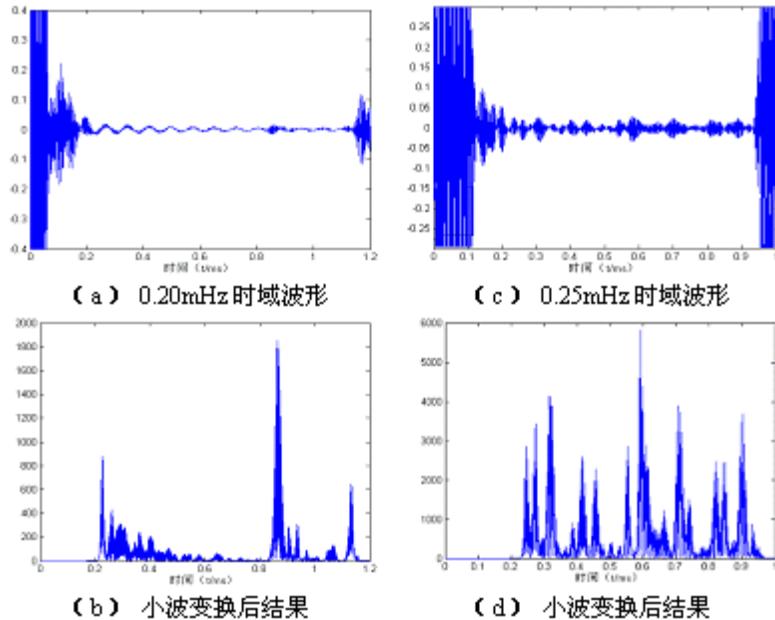


图 4 小波变换前后对比

Fig. 4 The contrast between the signals before wavelet transform and after wavelet transform

3.2 实验结果及分析

小波变换在超声无损检测中的应用较多,本文仅介绍超声导波在管材中传播时进行小波变换的情况。如图 4(a)所示为利用该实验装置进行空心抽油杆的缺陷槽检测时得到的时域信号,此时的激励频率为 0.20MHz,图 4(b)为该时域信号采用小波变换所得到的结果。图 4(c)给出了激励频率为 0.25MHz 时管道小孔缺陷检测的时域回波信号,图 4(d)则显示了其小波变换后的信号情况。

从图中我们可看到无论
是抽油杆的槽缺陷还是管道
的小孔缺陷,采用小波变换前
缺陷回波几乎看不到。尤其
是小孔缺陷检测的时域信号
由于其他干扰波包的存在,
更是难以识别,而小波变换后
我们可看到信号的信噪比大
大提高,使缺陷清晰可见,识别
起来更加容易。抽油杆上宽
为 1mm,深为 1mm 的周向槽
缺陷在约 0.84ms 时被检测到,管道
的小孔缺陷在约 0.60ms 时被检测到,这与理论计算的结
果都是相吻合的。这说明采用小波变换对超声导波检测信号进行处理是合适的。

图 5(a)所示为 0.25MHz 时对抽油杆的缺陷槽进行检测的时域结果,通过该图无法获取信号的频
域信息。图 5(b)为经过 Wigner-Ville 变换后的信号波形。从(b)图可看到有两处颜色较深的区域,它们的
频率约为 0.25MHz,颜色最深区域出现在大约 0.85ms 时,次深的区域出现在约 1 ms 时。这与理论
计算的 0.25MHz 下抽油杆上两处槽缺陷回波信号出现的时间是一致的,验证了抽油杆中两处槽缺
陷的存在。这说明采用 Wigner-Ville 变换,实现了超声导波非平稳信号的时频表示。另外从图中还可

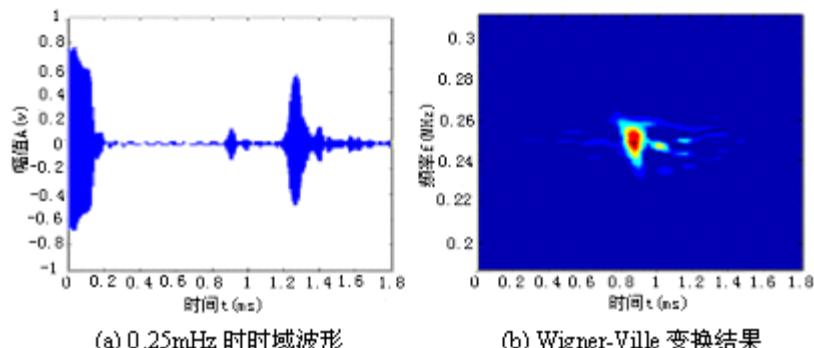


图 5 原始信号和 Wigner-Ville 变换后的信号

Fig. 5 Original and Wigner-Ville transformed signals

看到有一些呈点状散开的图形,这就是所谓的 Wigner-Ville 变换的交叉项了。但由于这些交叉项振幅比信号项振幅小的多,故它们并不会影响信号项的正确识别。

4 结束语

本文通过对管道的小孔缺陷和空心抽油杆的槽缺陷的检测,对于非平稳性的超声信号,利用两种不同的时频分析方法对其进行信号处理。信号进行小波变换后,可看到信号的信噪比大大提高,更易于缺陷的识别。当然对于小波变换还要进一步优化母小波,使其缺陷信号更加易于识别;而通过 Wigner-Ville 变换,则实现了非平稳信号的时频表示,可同时获得信号的时间和频率信息,达到了缺陷识别的目的,当然要进一步抑制其交叉项,减小它的干扰作用。

参考文献:

- [1] 何存富,吴斌,范晋伟.超声柱面导波技术及应用研究进展[J].力学进展,2001,(1):203~214 (He Cunfu,Wu Bin,Fan Jinwei. Advances in Ultrasonic Cylindrical Guide Wave Techniques and Their Applications. Advances in Mechanics, 2001, (1): 203~214 (in Chinese))
- [2] 焦敬品,何存富,吴斌等.管道超声导波检测技术研究进展[J].实验力学,2002,3(1):1~9 (Jiao Jingpin,He Cunfu,Wu Bin. Advances in Ultrasonic Guided Wave Techniques in Pipes. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 3(1):1~9 (in Chinese))
- [3] Siqueira M H S, Gatts C E N, R R da Silva, Rebello J M A. The Use of Ultrasonic Guided Waves and Wavelets Analysis in Pipe Inspection [J]. Ultrasonics, 2004, 41:785~797
- [4] 杨福生.小波变换的工程分析与应用[M].北京:科学出版社,1999 (Yang Fusheng. The Engineering Analysis and Applications of Wavelet Transform. Beijing:Science Press,1999 (in Chinese))
- [5] Rodriguez M A, San Emeterio J L, Lazaro J C, Ramos A. Ultrasonic Flaw Detection in NDE of Highly Scattering Materials Using Wavelet and Wigner-Ville Transform Processing[J]. Ultrasonics, 2004, 42:847~851
- [6] 胡昌华,夏启兵,周涛,张伟.基于 MATLAB 的系统分析与设计—时频分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,2002 (Hu Changhua, Xia Qibing, Zhou Tao, Zhang Wei. The System Analysis and Design Based on Matlab: Time-frequency Analysis, Xi'an:XiDian University Press, 2002 (in Chinese))

Ultrasonic Guided Wave Signal Analysis Based on Wavelet and Wigner-Ville Transform Processing

HE Cun-fu, LI Ying, WANG Xiu-yan, WU Bin, LI Long-tao

(Beijing University of Technology, Beijing 100022)

Abstract: The detection and characterization of defects in structures is an important issue in non-destructive testing. One of the main applications of ultrasonic guided waves is for pipe inspection, since it can inspect long distances in a short time. But the processing of the received signal is still an open problem. In this paper, the methods of wavelet transform and Wigner-Ville transform are applied to the signal analysis of guided wave inspection of defects in a hollow sucker rod. The experimental results show that after wavelet transform is applied, a high signal/noise ratio of defect echo signals is presented, defects can be identified and located easily; and after Wigner-Ville transform is adopted, defect echo signals can be shown clearly in time-frequency domain and defects can be identified easily. The investigation about application of the two signal processing methods to guided wave inspection signals supplies new realization basis for the signal processing of guided wave inspection.

Key words: NDT; guided wave; sucker rod; wavelet; Wigner-Ville transform