

超声导波定位管道缺陷的数值研究*

张伟伟**¹ 程载斌² 陈建云³ 马宏伟¹

(1 暨南大学理工学院, 广州 广东, 510632) (2 中国科学院力学研究所 北京 100080)

(3 宝鸡文理学院机电工程系, 宝鸡 陕西, 721007)

摘要: 本文建立了含缺陷管道的有限元模型, 以减薄单元厚度模拟管道缺陷。选择具有一定带宽的冲击信号作为激励进行管道缺陷检测, 为了消除弯曲和扭转模态对识别结果的影响, 进行对称加载对称接收。即管道左端对称的 32 个节点同时施加初始的轴向位移瞬态响应, 在靠近激励端一侧选取管道截面上对称的 32 个节点作为信号记录点, 最后进行简单叠加取平均, 获得超声导波在管道中的波形信号。为了提高波到时刻的识别精度, 将导波信号进行小波变换, 从小波系数的局部极大值可以清楚的分辨出导波信号的到达时刻和离开时刻, 从而提高了缺陷识别的精度。最后, 通过数值研究验证了上述推论的有效性。

关键词: 管道 应力波 小波变换 损伤检测

中图分类号: O235 TP277

1 引言

管道作为五大运输工具之一, 在石油、化工、天然气、食品工业等方面具有很大的优势。因此, 为确保管道服役安全, 及时发现管道中的微小缺陷就成为管道应用中的重大课题。传统的无损检测方法, 如射线、超声、磁粉、渗透和涡流检测等, 都要求对管道进行逐点扫描, 对于长距离的管线检测, 该方法遇到很大困难。因此, 采用超声导波对长管线进行检测, 具有巨大的经济效益。现今, 随着人们对固体中应力波传播特性的深入认识, 基于管道应力波的缺陷检测也越加可行, 其原理如图 1 所示

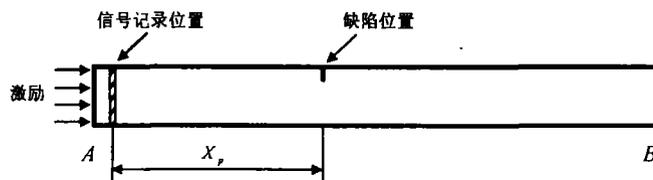


图 1 管道裂纹检测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of crack detection in pipe

假定距管道接收信号位置 X_p 处存在某型缺陷, 根据应力波理论, 导波在遇到缺陷时会发生反射、透射等现象, 记录入射信号和反射信号的时间差。当导波传播速度已知时, 就可以估算出缺陷距离信号接受点的距离, 即下式成立:

$$C \cdot \Delta t = 2x_p \quad \text{其中, } C = \sqrt{E/\rho(1-\nu^2)} \quad (1)$$

其中, 波速 C 为导波的群速度, 本文采用杨氏速度。 Δt 是脉冲入射波和反射波经过记录点的时间差。理论上讲, 管道中的缺陷位置可以由式(1)进行确定。该方法的优点在于信号遍布整个管道, 可以对管线进行整体检测。文献[1-2]对此进行了较为全面的综述。

导波信号在管道中的传播是一个高频信号的瞬态过程, 信号为非稳态信号。对于非稳态信号处理, 小波时频分析体现出了强大的优势, 已经在缺陷信号识别, 故障信号识别中取得了重要的应用成果。如, Wang[3]利用 db4 和 20 小波对变速箱的振动信号进行监测用于系统的故障诊断; 他证明了利用小波变换

*国家自然科学基金项目 (10672067); 广东省高校自然科学基金重点研究项目 (05Z003);

广东省科技攻关计划研究项目 (2006B12401008)

** 张伟伟, 男, 1978 年 2 月出生, 山西平顺人, 汉族。在读博士生, 研究方向结构损伤检测、弹塑性动力学。

直接从时域上去掉齿轮啮合频率后得到剩余信号来判断系统故障发生不如利用小波变换的 Scale-time 图上看有效, Scale-time 图更容易确定信号中异常点的发生时刻; Lama[4]利用结构模态信息在存在缺陷时的不连续性识别了梁结构中的缺陷; Su[5]等人利用小波清楚的识别了梁中弯曲波的波到时刻,从而对梁结构中的裂纹进行了定位研究。

本文拟将小波变换和管道导波相结合,将得到的导波信号进行连续小波变换,通过小波系数的突变来标定信号达到记录点和通过记录的准确时刻,从而提高管道缺陷的定位精度,同时也研究微小缺陷利用该方法的有效性。

2 数值模拟

为了验证上述方法的可行性,管道缺陷识别研究将通过有限元程序 ANSYS 来模拟。直管道模型长度为 2.6m,内径为 76mm,管壁厚为 5.5mm;材料参数: $E=200\text{GPa}$, $\rho=7.85\text{g/cm}^3$, $\nu=0.32$;选取 SHELL63 单元进行单元划分,单元厚度为 5.5mm。利用式(1)计算可知,导波在管道中的平均速度为 $C=5327.69\text{m/s}$ 。根据管道模型末端回波时间,传播总时间 $t=1.2\text{ms}$,时间步长为 $1.2\mu\text{s}$ 。在管道左端激发信号,距左端 50mm 处接收信号,进行以下两组缺陷管道模拟:

表 1 管道有限元模型中缺陷设置

算例	缺陷位置	缺陷几何尺寸		
		轴向长度	周向长度	厚度减少量
1	距离管左端 1700mm	2mm	18π	3.0mm
2	距离管左端 1700mm	2mm	18π	1.5mm

通常情况下,激励信号可以分为多模态激励信号和单一模态激励信号。但是,多模态信号频散和模态转化复杂,在分析上较为困难,所以单一模态信号成为研究人员所青睐的检测信号。D.N.Alleyne 等[6]研究指出, $L(0,2)$ 模式在一定的频带内呈现出非频散性,且传播速度较快,有利于长管线检测。随后,马宏伟[7],吴斌[8]等人利用 $L(0,2)$ 进行管道缺陷定位数值和实验研究。考虑到严格的单一模态信号在真实环境中并不存在,我们选用经 HANNING 窗函数调制的单音叠加频信号作为激励信号,其表达式为:

$$x(t) = \left[\frac{1}{2} \cdot \left(1 - \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t}{n} \right) \right] \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t) \quad (2)$$

其中 n 为选用的单音频数目、 f_c 为信号的中心频率。本文选用如上所述的调制信号作为激励信号,其中, $n=10$, $f_c=70\text{kHZ}$ 。激励信号如图 2 所示。选取管道左端作为信号输入端,在管端的 32 个节点上同时施加载荷,进行瞬态分析,选择 Full 方法(完全瞬态分析法),提取距左端 50mm 处 32 个节点在轴向方向的位移时程曲线作为导波信号。为消除弯曲模态和扭转模态的影响,对 32 条信号进行简单叠加并取平均值。算例 1 和算例 2 结果如图 3 所示。

从图 3(a)和 3(b),可以看到经缺陷返回的回波信号,理论上讲,通过量测入射波和反射波到达记录点的时间差,就可以估计缺陷距离记录点的位置。但两个算例中导波信号经过记录点时都存在一个时间宽度,时间宽度给确定以什么时刻作为波到时刻带了困难。为了便于计算,通常选择波形峰值到达时刻为波到时刻。然而,波峰的确定存在本身就会带来误差。尤其当缺陷较小时,确定波峰通过记录点的时刻就更加困难,如图 3(b)所示。为了解决这一困难,我们提出利用小波时频分析进行波到时刻的确定,利用小波分析的时频局部化的优势,确定信号经过记录点时的“达到时刻”和“通过时刻”,取其中值定义为波群的经过时刻。

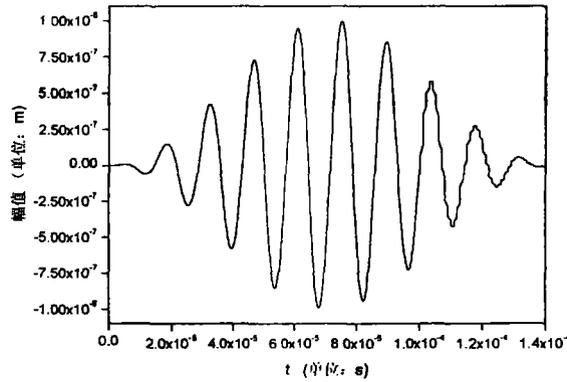


图 2 HANNING 窗调制 10 周期音频信号
Fig.2 Narrow band signal consisting of 10 cycles modulated by a hanning window:

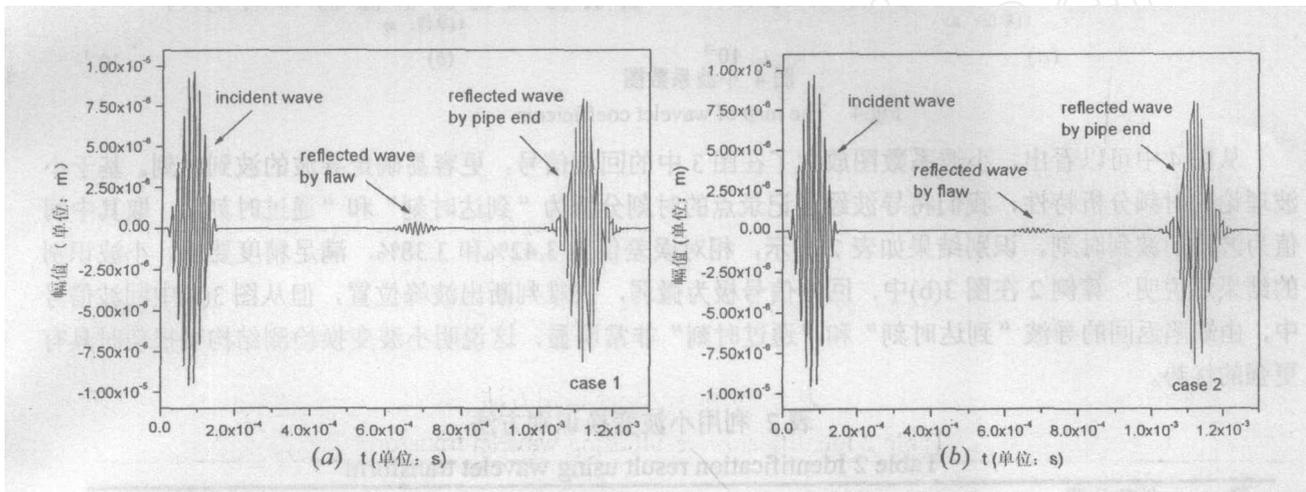


图 3 记录位置 32 个节点的位移时程曲线平均曲线
Fig.3 Average value of 32 records for Time-history curves

3 小波识别方法

小波分析作为最优秀的时频分析工具之一,已经在故障信号分析等几个方面得到了广泛应用。小波变换可以认为是把一个能量有限的信号分解到一组小波基上,小波基是由小波母函数经过平移、缩放形成的,设小波母函数为 $\phi(t)$,则要求其傅立叶变换满足下式成立

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\phi(\omega)|^2}{|\omega|^2} d\omega < +\infty \quad (3)$$

设 $f(t)$ 表示为时间域 $(-\infty, \infty)$ 上的信号,则 $f(t)$ 的连续小波变换就定义为:

$$W_c f(u, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \phi\left(\frac{x-u}{s}\right) dx \quad (4)$$

其中, $(1/\sqrt{s})\phi[(x-u)/s]$ 即为小波基, s 称为伸缩因子, u 为平移因子,显然当 s 较大时,对信号 $f(t)$ 的分析较为粗糙,当 s 较小时,对 $f(t)$ 的分析则细致的多。 $W_c f(u, s)$ 称为小波系数,同傅立叶系数类似,值越大说明信号特性在该点位置和小波函数越接近。因此,我们可以选择特定的小波函数进行小波变换,通过小波系数的大小来确定信号特性。文献[9]通过数值研究指出,具有低阶消失矩的小波在指示信号中突变时效果较好,因此,本文选用具有 1 次消失矩的 haar 小波作为变换小波。将图 3 中的信号进

行小波分析,小波系数图如图4所示。

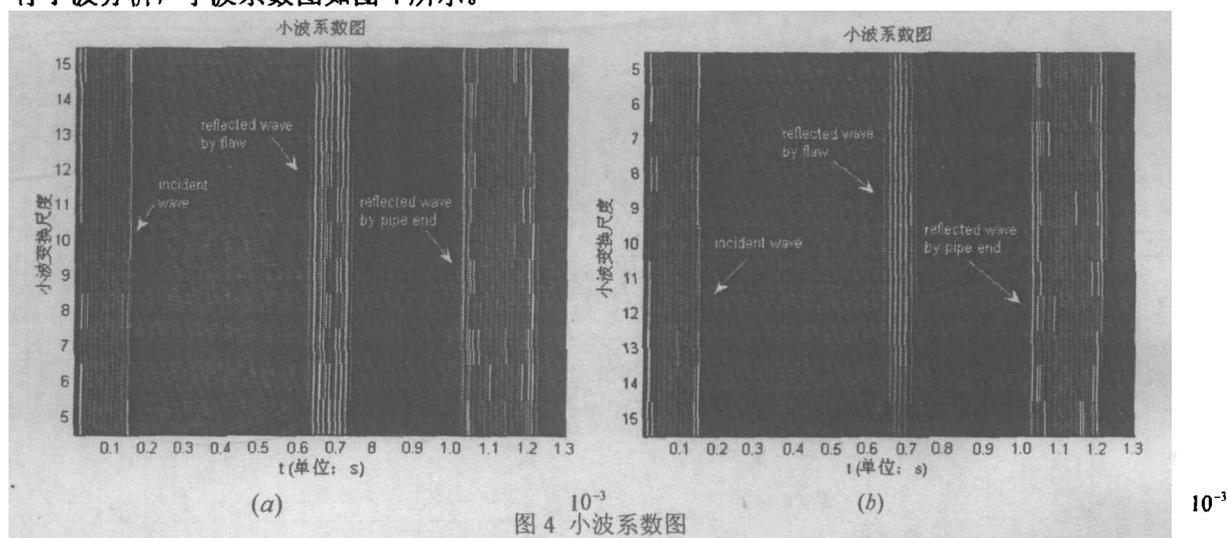


图4 小波系数图

Fig.4 The map of wavelet coefficients

从图4中可以看出,小波系数图放大了在图3中的回波信号,更容易确定导波的波到时刻。基于小波理论的时频分析特性,我们将导波经过记录点的时刻分解为“到达时刻”和“通过时刻”,取中间值为波群的波到时刻。识别结果如表2所示,相对误差仅为3.42%和3.38%,满足精度要求。小波识别的结果还说明,算例2在图3(b)中,回波信号极为微弱,很难判断出波峰位置,但从图3(b)中回波信号中,由缺陷返回的导波“到达时刻”和“通过时刻”非常明显,这说明小波变换检测结构微损伤时具有更强的优势。

表2 利用小波变换识别方法

Table 2 Identification result using wavelet transform

算例	缺陷位置 (距离记录点)	入射信号		回波信号		识别结果	相对误差
		到达时刻	通过时刻	到达时刻	通过时刻		
1	1650mm	0.0155ms	0.1440ms	0.6371ms	0.71992ms	1593.53mm	3.42%
2	1650mm	0.0124ms	0.1429ms	0.6339ms	0.7189ms	1594.91mm	3.38%

4 结论与讨论

本文以调制的单音频叠加信号作为激励信号,通过ANSYS有限元程序进行了管道缺陷检测。为了消除弯曲和扭转模态对管道缺陷识别的影响作用,文中采取了对称激励信号,即沿管道截面32个节点同时加载,在靠近激励端设置信号记录点,同为32个。将得到的32条信号进行简单的叠加取平均得到单一模态L(0,2)模态的导波信号。并比较了直接利用导波信号和通过小波系数图识别波到时刻的精度差别。通过本文的研究,得到以下结论:

- 1、基于导波的管道识别方法,可以方便的对管线进行检测,其检测方法可靠,适合于长管线的损伤检测。
- 2、单音频叠加信号检测损伤,能在一定程度克服导波传播过程在的频散和模态转化特性,具有一定的识别精度。对称加载和多点接收信号有利于小波弯曲模态和扭转模态的导波信号。
- 3、小波变换可以放大回波信号,有利于在结构发生损伤的早期对结构进行检测。

参考文献:

略