

# 含缺陷管道超声导波检测信号的相关性分析

张伟伟<sup>1</sup>, 王志华<sup>2,3</sup>, 马宏伟<sup>1</sup>

(1. 暨南大学理工学院“重大工程灾害与控制”教育部重点实验室, 广东 广州 510632;  
2. 太原理工大学应力所, 山西 太原 030024; 3. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**[摘要]** 提出一种基于相关性分析的管道缺陷检测方法. 该方法通过截取入射信号作为主动检测信号, 将实测信号作为被检测信号. 借助于合适的窗函数计算检测信号和不同时刻测试信号的相关系数, 通过相关系数的峰值点判断波到时刻, 从而提高识别精度. 为了消除来源于模式转换和噪声的杂波信号, 设置阈值可达到滤波效果. 利用该方法, 对单位置腐蚀和双位置腐蚀, 在不同噪声水平下的测试信号进行相关性分析. 结果表明, 阈值法可以较好地抑制噪声和模式转换对识别结果的影响, 且具有较高的识别精度. 该方法原理简单, 操作简便, 可用于管道腐蚀检测的在线检测.

**[关键词]** 管道; 超声导波; 相关性; 损伤检测

**[中图分类号]** O235 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-9965(2009)03-0269-04

## Signal correlation analysis of ultrasonic guided wave in damaged pipe

ZHANG Wei-wei<sup>1</sup>, WANG Zhi-hua<sup>2,3</sup>, MA Hong-wei<sup>1</sup>

(1. College of Science & Engineering, The Key Laboratory of Disaster Forecast and Control in Engineering, Ministry of Education of China, Jinan University, Guangzhou 510632, China;  
2. Institute of Mechanics, Taiyuan University of technology, Taiyuan Shanxi 030024, China;  
3. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**[Abstract]** In this paper, it is suggested that the scheme of corrosion detection in a pipe based on correlation coefficients. In this scheme, the incident signal is defined as the active detected signal (ADS), while the measurements signal is treated as the passive detection signal (PDS). The correlation coefficients between ADS and PDS at different time are calculated with the help of a window function, from which the arriving time of the echo by the damage could be determined. A suitable threshold is proposed to reduce the influence of the noise. Simulation shows that the scheme is good for damage detection on-line for locating one or two flaws in a pipe.

**[Key words]** pipe; ultrasonic guided wave; correlation; damage detection

## 1 基本理论

超声导波技术是基于 Rayleigh 和 Lamb 等<sup>[1]</sup>关于有界结构中应力波传播的理论成果提出的. 基本原理是应力波在有界的结构中传播时遇到缺陷会发

生散射、透射、折射等现象, 通过研究应力波在管道中的传播特性, 可以评估管道的完整性. 由于应力波传播速度快, 可对深埋或不易触及的构件进行检测, 且检测是“线”而非“点”, 因此, 超声导波技术在提出后不久就引起了长距离管线检测工作者的重

**[收稿日期]** 2008-07-18

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(10672067); 广东省科技攻关项目(2006B12401008); 广东省高校自然科学重点研究项目(05Z003)

**[作者简介]** 张伟伟(1978-), 男, 博士研究生, 研究方向: 结构损伤识别

通讯作者: 马宏伟, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 结构损伤检测, 弹塑性动力学研究

视<sup>[2-3]</sup>。如图1所示,设管道AB的D点发生一定程度的腐蚀,如果在管道的左端激发管道应力波信号,根据应力波传播理论,导波在遇到缺陷时会发生反射、透射以及模式转换等现象,记录应力波入射信号(由激励源产生的管道应力波信号)和反射信号(指缺陷反射的回波信号)的时间差,当导波传播速度已知时,就可以依据式(1)估算出缺陷距离信号接受点的距离:

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

其中,波速 $C$ 为导波的群速度,可用杨氏速度近似。 $\Delta t$ 是脉冲入射波和反射波经过记录点的时间差。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。本研究运用数值手段研究了含腐蚀缺陷管道中的应力波传播特性,并结合信号相关性分析建议了一种具有较高识别精度的管道缺陷定位方法。

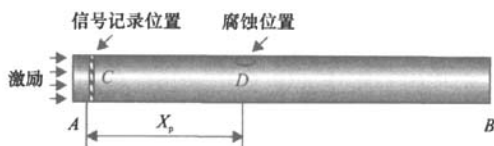


图1 管道裂纹检测示意图

## 2 管道应力波的有限元模拟

应用ANSYS通用程序对一段含有腐蚀的管道进行有限元模拟。选取长为2.6 m的含缺陷直管进行分析,管道几何参数和材料参数分别为:内径,76 mm;管壁厚,5.5 mm; $E=200$  GPa; $\rho=7.85$  g/cm<sup>3</sup>;  $\nu=0.32$ 。

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。由于多模态信号的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。根据文献[4-6]的研究经验,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, $f_c$ 为信号的频率。本研究选用如上所述的调制信号作为激励信号, $n=10$ , $f_c=70$  kHz。选取SHELL63单元进行单元划分,环向设置32个单元,轴向单元长度为2 mm。在距离左端1.5 m处连续选取8个单元,减薄1.5 mm模拟腐蚀。记录距左端50 mm处32个节点在轴向方向的位移时程曲线作为导波接受信号,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作为最终的测试信号。由于实测信号总会伴有一定的噪声,考虑如下噪声模型:

$$\bar{X}(t) = X(t) + \sigma \cdot e(t) \quad (3)$$

其中, $X(t)$ 为纯应力波信号, $e(t)$ 为一随机函数模拟噪声,可以被看作均值为0,方差为1的高斯白噪声,引入噪声水平 $\sigma$ ,表示噪声污染程度, $\bar{X}(t)$ 为混有了噪声的信号。

## 3 基于相关性分析的回波缺陷定位法

管道导波信号的传播是一个十分复杂的过程,具有频散性和多模态性,缺陷回波信号更是如此。如果将信号看作是在时间上的随机分布,则激发信号与缺陷回波信号比较于噪声信号具有较高的相关性。根据这一理论,通过求其相关系数可以把回波信号中的特征信号从噪声中分离出来。为此,将记录的检测信号的第一个波包(即入射信号)作为主动检测信号,记为 $S_0$ ;将记录下全时域信号作为被检测信号 $S$ ,构造和检测信号长度相同的窗函数 $g(t-\tau)$ ,截取被检信号获得信号 $S^*$ ,即

$$S^* = g(t-\tau)S, \quad g(t-\tau) = \begin{cases} 1 & t \in (\tau-\delta, \tau+\delta) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\delta=t_0/2$ ,即激励信号的1/2长度。其与检测信号的相关系数定义为:

$$R(\tau) = \rho(S_0, g(t-\tau)S) = \frac{\text{Cov}(S_0, S^*)}{\sqrt{\text{Var}(S_0)} \sqrt{\text{Var}(S^*)}} \quad (5)$$

式(5)中, $\text{Cov}(\cdot)$ 表示协方差, $\text{Var}(\cdot)$ 表示方差。相关系数是表示两个变量之间的相关程度,是一个取值介于-1~1之间的无量纲量,并且,其值和变量本身取值没有关系,只和其分布方式相关。因此,回波信号与激励信号之间的相关忽略了回波信号的强度,可以有效地判断出回波信号是否由激励信号所产生。其中,若 $0 < R < 1$ ,称为正相关,即两变量分布方式具有相同趋势;若 $-1 < R < 0$ ,称之为负相关,即两变量分布方式具有相反趋势;特别地,若 $R=1$ ,则两变量完全正相关;若 $R=-1$ ,则两变量完全负相关;当 $R=0$ 说明两变量不相关。为了便于观察,取其绝对值:

$$R = |R(\tau)| \quad (6)$$

图2(a)所示为含1%噪声时的检测信号,从图中可以看出缺陷回波受噪声影响较大。依据式(5)和(6)计算其相关系数,如图2(b)所示,相关系数大大增强了缺陷回波信号的观察性。从各波包的峰值可

以定位出缺陷回波的返回时刻。在图2(b)中,除缺陷回波外,还存在一些小的波包,这有两方面的原因:①应力波经过缺陷反射后,由于介质的不对称致使反射信号经模态转换出现了其它模态,和检测信号有一定的相关性;②噪声和检测信号也有一定程度的相关性。为了消除噪声和转换模态信号的影响,引入一个相关系数阈值,即,当计算获得的相关

系数大于该阈值,保留其值,否则强制使其为0。经过研究白噪声和该检测函数的相关系数,认为阈值设置为0.4较为合适。图3所示为含2%和3%大噪声时的相关性分析结果,可见,尽管随着噪声水平的增加,相关系数会有所降低,但对于回波信号定位效果明显。同时也表明在含3%大噪声时该方法也有较好的识别效果。

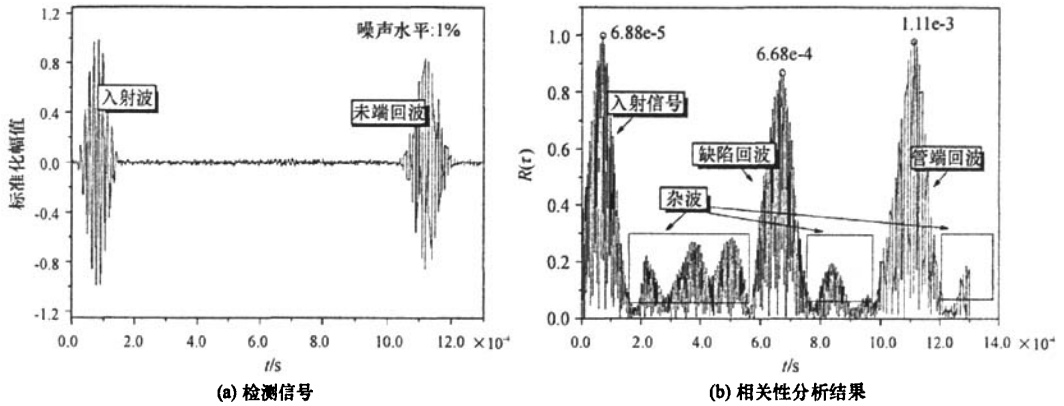
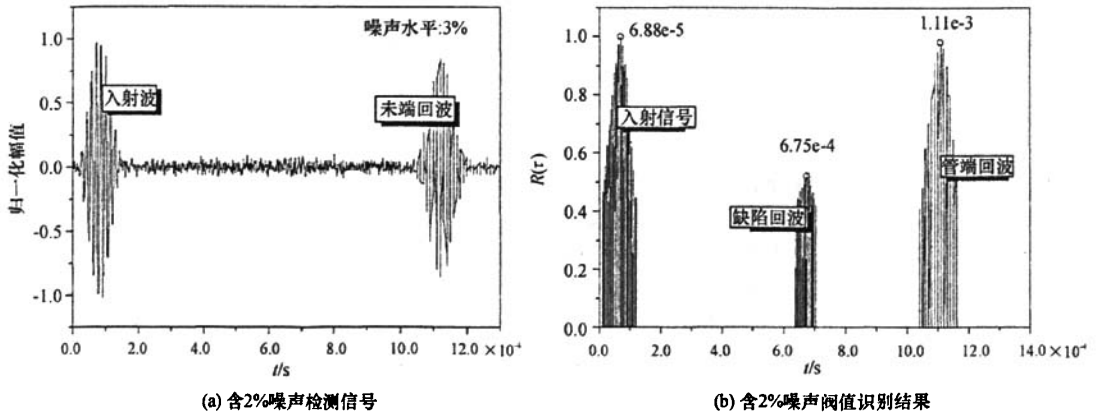


图2 噪声水平为1%时测试信号和相关性分析结果



(a) 含2%噪声检测信号

(b) 含2%噪声阈值识别结果

(c) 含3%噪声检测信号

(d) 含3%噪声阈值识别结果

图3 噪声水平为2%, 3%时检测信号和阈值识别结果

上述实例说明利用相关系数可以有效地检测出由微缺陷返回的弱信号,使得管道缺陷早期检测更为有效. 为了进一步验证该方法的有效性,对管道中含有两处缺陷的情况进行研究,即在完好管道模型基础上设置缺陷,两缺陷分别位于距管到左端1 m和2 m处腐蚀2 mm,其它参数相同:环向腐蚀占管道断面的1/4,轴向2 mm. 因腐蚀壁厚减薄约35%,横断面总共减少8.5%,属于损伤早期. 利用第2节中有限元分析,并考虑3%的噪声水平,记录

超声导波测试信号如图4(a)所示. 从图中可以看出,由于噪声的存在,回波信号被噪声完全淹没,无法识别出由缺陷返回的回波信号. 利用式(5)和式(6)求该信号与检测信号的相关系数,并对其进行阈值处理,结果如图4(b)所示,两处回波信号均可有效地识别出. 可见,即使是在不确定的腐蚀情况下,噪声水平达3%时,该方法也具有较高的识别精度.

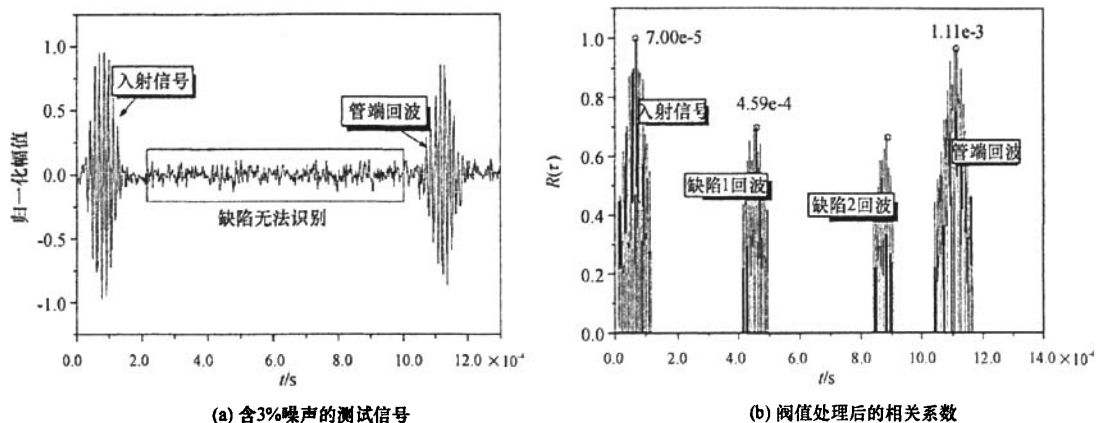


图4 双位置缺陷管道检测信号与识别结果

## 4 结论

本文简述了管道超声导波缺陷检测技术的原理,并提出了应用相关系数进行缺陷的定位方法. 该方法主要有3个步骤:

首先,在测试信号上截取入射信号作为主动检测信号,将测试信号作为被检测信号.

然后,构造一个合适的窗函数,通过窗函数的平移计算检测信号与测试信号在不同时刻的相关系数. 相关系数的峰值点就表示了超声导波的波到时刻.

最后,为了消除来源于模式转换和噪声的杂波信号,本文讨论了噪声和检测信号的相关性,并依此设置相关系数的阈值.

为了验证本文方法的有效性,对单位置腐蚀和双位置腐蚀,在不同噪声水平下的测试信号进行了缺陷定位的数值研究. 分析结果表明,相关系数可以有效地检测出由微缺陷返回的弱信号,具有较高的灵敏度,阈值法可以较好的抑制噪声和模式转换对识别结果的影响,且具有较高的识别精度. 该方法原理简单,操作简便,可用于管道腐蚀检测的实时检测.

## [参考文献]

- [1] HAYASHI T, TAMAYAMA C, MURASE M. Wave structure analysis of guided waves in a bar with an arbitrary cross-section. [J]. Ultrasonics, 2006, 44: 17 - 24.
- [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,2002,17(1):1-9.
- [3] 程载斌,王志华,马宏伟. 管道应力波检测技术及研究进展[J]. 太原理工大学学报,2003,34(4):426 - 431.
- [4] ALLEYNE D N, LOWE M J S, CAWLEY P. The reflection of guided waves from circumferential notches in pipes [J]. Journal of Applied Mechanics September, 1998, 65: 635 - 641.
- [5] 程载斌,王志华,张立军,等. 管道超声纵向导波裂纹检测数值模拟[J]. 应用力学学报,2004,21(4):76 - 79.
- [6] 吴斌,刘增华,王秀彦,等. 利用纵向导波检测充水管道周向缺陷的实验研究[J]. 中国机械工程,2005,16(22):2038 - 2043.

[责任编辑:刘蔚媛]