

文章编号 1004-924X(2017)05-1197-09

应用微分算法处理特种管道测厚激光超声信号

曹建树¹, 罗振兴^{2*}, 姬保平¹

(1. 北京石油化工学院 机械工程学院, 北京 102617;

2. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 为了实现特种管道在高温、高压、辐射等特殊环境下管壁厚度的非均匀性检测, 提出一种基于微分算法的管道壁厚激光超声测量及特征信号处理方法。采用脉冲激光激励和激光干涉探测的激光超声方法, 实验测得管道试件的宽频带激光超声信号。采用数字平均算法对宽带激光超声信号进行去噪处理, 提高原始激光超声信号的信噪比。采用微分算法对激光超声信号进行特征提取处理, 得到表征管壁厚度的激光超声特征信号。根据管道材料声速和激光超声传播时间反演计算得到管道试件的壁厚值, 管壁厚度测量值与实际值的误差小于 5%。研究表明, 基于微分算法的管道壁厚激光超声测量及特征信号处理方法具有良好的信噪比、准确的信号特征量和较高的测量精度, 可用于管道壁厚的在线实时检测以及因腐蚀、应力引起的管道壁厚不均匀性检测。

关键词: 激光超声; 特种管道测量; 信号去噪; 微分算法; 特征提取

中图分类号: TE88 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172505.1197

Laser ultrasonic signal processing by differential algorithm in special pipeline thickness measurement

CAO Jian-shu¹, LUO Zhen-xing^{2*}, JI Bao-ping¹

(1. College of Mechanical Engineering,

Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering,

Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

* Corresponding author, E-mail: 991628069@qq.com

Abstract: In view of the nonuniformity of pipe wall thickness of the special pipe under special environments such as high temperature, high pressure, radiation, and others, a method for laser ultrasonic measurement and thickness feature signals processing based on the differential algorithm was proposed. The laser ultrasonic method was adopted with pulse laser excitation and laser interference detection for the experimental measurement of broad-band laser ultrasonic signals of the test piece of pipe. Then the broad-band laser ultrasonic signals were de-noised by average algorithm in order to increase the signal to noise ratio of the original laser ultrasonic signals. Furthermore, the feature of the de-noised ultrasonic signals was extracted by differential algorithm, outputting the laser ultrasonic feature signals of pipe wall thickness. According to the sound velocity of pipe material and

收稿日期: 2017-01-05; 修订日期: 2017-02-21.

基金项目: 北京石油化工学院优秀学科带头人培育计划资助项目(No. BIPT-BPOAL-2014); 企业课题(No. H16-071)

the laser ultrasonic transit time, the thickness values for the test piece of pipe wall were deduced. The error between the measured and actual thicknesses was less than 5%. The result shows that the processing method for thickness feature signals based on differential algorithm can provide favorable signal to noise ratio, accurate signal feature quantity and higher measurement accuracy, thus can be used for online real-time measurement of wall thickness of pipe and the thickness nonuniformity led by erosion and stress.

Key words: laser ultrasound; special pipeline measurement; signal de-noising; differential algorithm; feature extraction

1 引言

在核电领域,特种管道是核压力容器的常用结构之一。此类结构在长期服役过程中受高温(350 °C)、高压(15 MPa)、辐射等特殊环境的作用容易产生裂纹、腐蚀等多种类型的缺陷,进而危及结构安全,导致重大事故。因此,必须对此类结构进行定期的检测和监测,以保证结构的完整性和可靠性。目前,常用的缺陷检测方法主要有压电超声法、磁粉探伤法、涡流检测法、漏磁检测法、磁记忆检测法等^[1-2]。但是,这些方法难以对处于高温、高压、辐射环境的在役管道进行远距离、非接触、高精度的检测和监测,因为这些环境不仅检测难度较大,还会威胁检测人员的人身安全。例如,在线热轧钢管检测时,压电换能器很难承受 1 200 °C 的高温。因此,发展适用于高温、高压、辐射、腐蚀等特殊环境的检测方法,实现在役管道的远距离、非接触、高精度检测,对保障核压力容器的安全可靠运行和检测人员安全具有重要的作用和意义。

激光超声检测利用激光远距离地激励和探测超声波进行材料和结构的检测,具有非接触、高精度和高效率等特点。该方法适用于高温高压、腐蚀、辐射等场合,可以实时在线检测管道厚度的变化,在强辐射环境下能够有效避免操作人员接触辐射源,并准确检测管道压力容器设备的腐蚀等多种缺陷。目前,激光超声检测已成为特种管道检测研究的热点,特别适用于实时在线热轧钢管的检测、管道的验收检测等场合^[3-4]。但是利用激光超声对管道厚度进行检测时,受激光超声本身、声传播介质、随机噪声等多种因素的影响,接收到的超声信号通常是比较复杂的叠加波形。如何从

中提取有用的波形信息是管道缺陷检测的关键。

传统的信号处理方法包括平均值滤波、自适应滤波、递归分析、包络滤波等。王洪超等人^[5]通过基于递归分析的邻域半径参数估计对信号进行降噪处理,为局部降噪算法奠定了基础,但是在噪声较高时降噪效果不明显。迟大钊等人^[6]采用 RLS 自适应滤波技术对信号进行杂波抑制处理,有效地去除了时基抖动信号中的杂波,但是算法过于复杂,耗时较长。童允等人^[7]使用包络滤波技术对电磁超声检测信号进行降噪处理,有效地抑制了噪声的幅度,提高了信噪比,但是难以消除幅度较大的噪声和干扰,且包络修正的阈值是人为给定的,无法适应不同幅度和信噪比的数据。另外,传统的信号处理方法在去噪过程中容易丢失数据的高频特征。与传统的信号处理方法相比,小波变换法能够根据信号和噪声在不同尺度上的表现分别对它们进行处理,具有多分辨率适应性,可以在消去噪声的同时很好地保留信号的突变部分,实现弱信号检测和信噪比增强;而微分法能够有效去除低频干扰,同时加强高频成分。因此,小波变换和微分算法适合于超声缺陷检测中突变信号的处理^[8-10]。

鉴于此,本文研究了一种基于微分算法的管道壁厚激光超声测量及特征信号处理方法。采用脉冲激光激励和激光干涉探测的激光超声方法实验测得管道试件的宽频带激光超声信号;采用数字平均算法对宽带激光超声信号进行去噪处理,提高原始激光超声信号的信噪比;采用微分算法对激光超声信号进行特征提取处理,得到表征管壁厚度的激光超声特征信号。该方法具有良好的信噪比、准确的信号特征量和较高的测量精度,适用于管道壁厚的在线实时检测以及因腐蚀、应力引起的管道壁厚不均匀性检测。

2 微分算法原理

微分运算作为一种基本的数学运算,在信号分析与处理等领域得到了广泛的应用,特别在信号的奇异性检测和提取方面具有特殊的作用。分数阶微分是整数阶微分运算的推广,理论研究发现,当微分阶数较小($0 < \nu < 1$)时,信号进行分数阶微分运算的高频分量被大幅提升的同时信号中低频则有所加强,且信号的甚低频没有进行大幅衰减,而是进行了非线性的保留。

对任意一个满足傅里叶变换基本条件的函数 $f(x)$,定义:

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-j\omega x} dx. \quad (1)$$

假设 $f(t)$ 的整数 $k(k \in \mathbf{Z}^+)$ 阶微分存在:

$$f^{(k)}(t) = D_k f(t) = \frac{d^k f(t)}{dt^k}. \quad (2)$$

则它的傅里叶变换为:

$$(D_k \hat{f})(\omega) = (i\omega)^k \hat{f}(\omega) = \hat{d}_k(\omega) \hat{f}(\omega), \quad (3)$$

式中: $\hat{d}_k(\omega) = (i\omega)^k$, 为 k 阶微分乘子函数, $\hat{d}_k(\omega)$ 的指数形式为:

$$\begin{cases} \hat{d}_k(\omega) = \hat{a}_k(\omega) \exp(i\theta_k(\omega)) \\ \hat{a}_k(\omega) = |\omega|^k, \theta_k(\omega) = \frac{k\pi}{2} \text{sgn}(\omega), k \in \mathbf{Z}^+. \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)中的整数阶推广到任意阶算子 D_ν , 对应的 $D_\nu (\nu \in \mathbf{R}^+)$ 得到分数阶微分 $f^{(\nu)}(t)$ 在频域的形式:

$$(D_\nu \hat{f})(\omega) = (i\omega)^\nu \hat{f}(\omega) = \hat{d}_\nu(\omega) \hat{f}(\omega). \quad (5)$$

乘子 $\hat{d}_\nu(\omega)$ 在频域的指数形式为:

$$\begin{cases} \hat{d}_\nu(\omega) = \hat{a}_\nu(\omega) \exp(i\theta_\nu(\omega)) = \hat{a}_\nu(\omega) \hat{p}_\nu(\omega) \\ \hat{a}_\nu(\omega) = |\omega|^\nu, \theta_\nu(\omega) = \frac{\nu\pi}{2} \text{sgn}(\omega), k \in (0, m). \end{cases} \quad (6)$$

乘子 d_ν 的时域形式为:

$$d_\nu(t) = a_\nu(t) p_\nu(t), \quad (7)$$

$$a_\nu(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{a}(\omega) e^{j\omega t} d\omega = -\frac{1}{\pi} \sin \frac{\nu\pi}{2} \frac{\Gamma(\nu+1)}{|t|^{\nu+1}} \quad (8)$$

$\Gamma(n)$ 为 Gamma 函数,其表达式为:

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} t^{n-1} e^{-t} dt = (n-1)!, \quad (9)$$

$$p_\nu(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\theta_\nu(\omega)} e^{j\omega t} d\omega = \cos \frac{\nu\pi}{2} \delta(t) - \sin \frac{\nu\pi}{2} \cdot \frac{1}{\pi t}. \quad (10)$$

根据式(4)和式(6)可以得到不同微分阶数的幅频曲线,经过微分运算后信号的高频成分被显著增强,其增强作用随着频率的增加和微分阶数的增大呈现出非线性激增的趋势;同时微分算法对信号中的低频成分还起到一定程度的抑制作用,此外还可以将信号中的零频直流分量消除掉^[14-16]。

在利用纵波检测试件厚度时,为了能快速准确地捕捉各次回波信号的时间点,计算出相邻两次纵波回波的到达时间差,设计了一种快速整数阶微分算法,用于处理激光超声信号中快速变化的特征点^[17]。

假设 $W_1(i)$ 是激光超声测厚信号被采集卡采样后的波形序列, $W_2(i)$ 是 $W_1(i)$ 序列一次微分后的序列, $W_3(i)$ 是 $W_1(i)$ 序列二次微分后的序列, $W_4(i)$ 是序列 $W_3(i)$ 经过一次阈值比较处理得到的序列。阈值处理功能是去除信号中的小幅度干扰。

(1) 一次微分:

$$W_2(i) = W_1(i+k) - W_1(i). \quad (11)$$

(2) 二次微分:

$$W_3(i) = W_2(i+k) - W_2(i). \quad (12)$$

(3) $W_3(i)$ 波形幅值的绝对值估计:

$$H = \max\{|W_3(i)|\}. \quad (13)$$

(4) 阈值去干扰归一化处理:

$$W_4(i) = \begin{cases} |W_3(i)/H|, W_3(i) > xH \\ 0, W_3(i) \leq xH \end{cases}. \quad (14)$$

式中: i 表示经过超声信号的采样时间序列; k 是经验值,取值大小需要根据经验确定,一般取值是 $2 \sim 5$; $x \in [0, 1]$, 为经验阈值系数,需要根据实际情况来确定。

3 实验装置与方法

3.1 实验装置

实验采用的激光超声检测系统原理如图1所示,该系统由硬件系统和软件系统两部分组成。如图2所示,硬件系统主要包括脉冲激光器(激发超声波)、连续激光双波混合干涉仪(探测超声波)、管道支撑旋转机构以及高速数字化仪和光纤等。软件系统主要包括管道转动和移动控制、数

据采集与保存、数据分析、图像显示等功能。实验过程中,脉冲激光投射到管道表面后在其表面激发出多种模式的超声波,超声波传播过程中遇到缺陷会发生反射、衍射等行为;反射的超声波传播至管道表面引起振动,激光干涉检测系统接收后将位移信息转换为电压信号,并输出给数据采集卡进行 A/D 转换;最后在计算机中对采集到的数据进行分析 and 图像显示。

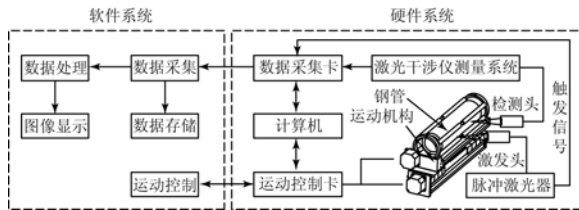


图 1 激光超管道检测系统构成

Fig. 1 Composition of laser ultrasonic pipeline inspection system

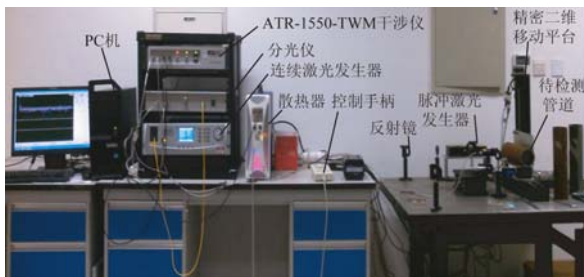


图 2 激光超声检测系统实物图

Fig. 2 Physical diagram of laser ultrasonic testing system

3.2 试样

实验采用的管道试件如图 3 所示,管道长度为 180 mm,内径为 41 mm,外径为 46 mm。管道原始外径为 48 mm,在车床上切削去掉表面的氧化皮,切削深度为 1 mm,切削时采用管道外表面定心,由于管道的内圆和外圆存在同心度误差,切割后管道壁厚不均匀。实验时采用砂纸对表面进行磨光处理,尽可能提高检测波的反射率。实验材料采用管线钢 X80,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa,泊松比 σ 约为 0.3。根据超声波在固体中的传播速度计算公式得到:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}}, \quad (15)$$

$$C_S = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2(1+\sigma)}}, \quad (16)$$

$$C_R = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1+\sigma} C_S, \quad (17)$$

式中: C_L , C_S , C_R 分别表示纵波、横波和表面波的传播速度, ρ 表示密度,求得参数如表 1 所示。



图 3 实验钢管试件

Fig. 3 Steel specimen

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

参数	数值
纵波速度 $C_L / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	5 912
横波波速 $C_S / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3 231
瑞利波波速 $C_R / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2 989
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 800
屈服极限/MPa	551
外径/mm	46
内径/mm	41

3.3 实验方法

激光激发超声波的方法包括热弹激发和烧蚀激发。由于热弹机制激发超声时,光热转换效率较低,不利于超声回波的接收,且在实际检测时往往需要在表面添加涂层;所以对于要求超声强度高的场合,往往采用烧蚀机制。不过,采用烧蚀机制激发超声会产生零点几微米的损伤,具体损伤程度受脉冲激光能量、光源种类、光斑尺寸等因素的影响。为了观测到明显的超声信号,选择烧蚀法激发超声波会产生纵波、横波、表面波等多种模式的声波。其中,横波强度远弱于纵波强度,检测时容易检测到纵波信号,而横波信号通常淹没在噪声中。图 4 是烧蚀法激发纵波的远场分布。

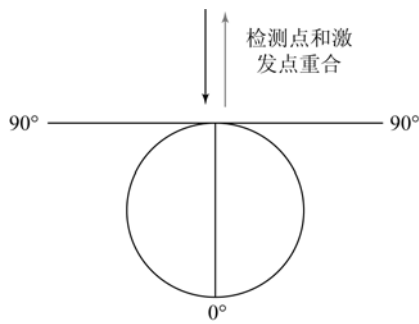


图 4 烧蚀激发产生的纵波远场分布图

Fig. 4 Distribution of longitudinal waves generated by ablation excitation

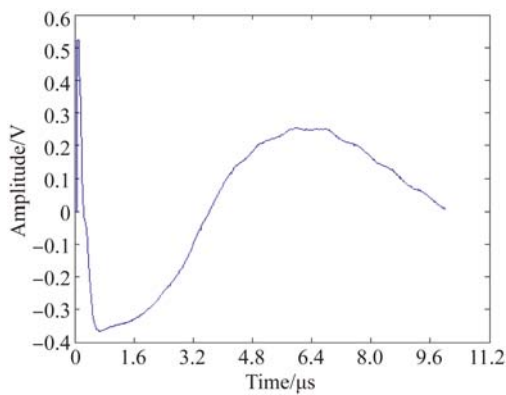


图 5 原始信号

Fig. 5 Original signals

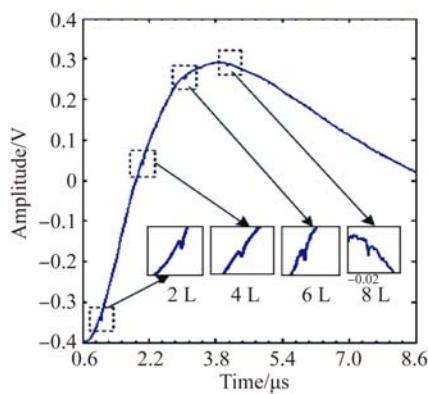


图 6 截断信号

Fig. 6 Truncated signals

由于激光检测点和激发点重合,在零时附近可检测到表面波,但是激光烧蚀产生的强光干扰信号也在零时刻附近,而且其强度远远大于表面波,两者在时域上是重合的,如图 5 所示。在 0~600 ns 有强烈干扰,无法识别表面波。为去除强光干扰,截取 600 ns 之后的数据进行分析,结

果如图 6 所示。但是烧蚀产生的爆炸波也会干扰检测结果,并且它与有用信息在时域上是重合的,使得采集到的激光超声信号含有趋势项。其中 4 L、6 L、8 L、10 L 分别代表 2 次、3 次、4 次、5 次纵波回波。激光超声信号中低频趋势项的幅值约为 700 mV,而各次纵波的幅值远小于低频趋势项干扰。此外,激光超声测厚信号中除包含有纵波外,还包含其它模式的波、环境低频干扰、宽带随机噪声等,以致采集到的激光超声信号是一个复杂的混合叠加信号。这里先采取数字平均法进行数据预处理,提高激光超声信号的信噪比^[18],再采用微分算法对信号进行特征提取处理。

在微分算法运行的过程中,根据捕捉突变点微分算法的式(11)~式(14),基于 LabVIEW 编写该快速微分算法程序,其框图如图 7 所示。第一个循环实现快速一阶微分,首先利用数组大小函数得到信号长度,信号长度再减去经验值 k 就是一阶微分计算的循环次数;第二个循环在一阶微分的基础上实现快速二阶微分;第三个循环实现阈值去噪和归一化处理,首先找到二阶微分后信号中的最大值,然后将最大值与经验阈值系数相乘得到经验阈值,之后再将信号数据序列中的数据与经验阈值相比较。当数据大于经验阈值时,将该数据除以最大值进行归一化处理;若该数据小于经验阈值,将该值置为零。

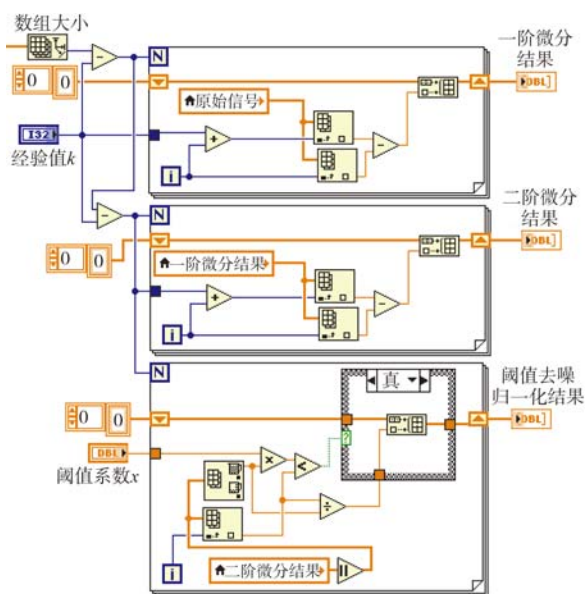


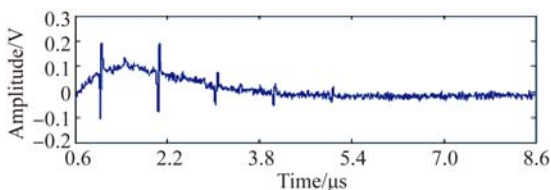
图 7 微分算法程序框图

Fig. 7 Block diagram of differential algorithm

4 实验及结果分析

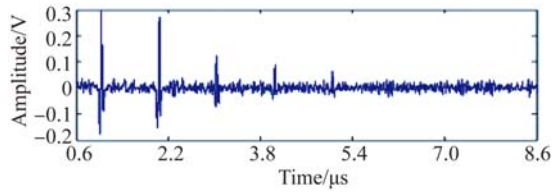
4.1 单点测厚信号微分法特征提取

实验过程中,激光激发点与接收点重合,钢管试件固定不动,采样频率为 125 MHz,采集点的时间间隔为 8×10^{-9} s。利用快速捕捉微分算法对试件超声测厚实验数据进行处理。为了清晰地观测到该点测厚信号的第 5 次回波特征,经验阈值系数 x 要小于第 5 次回波信号与第一次回波信号的幅值之比。测得第 5 次回波信号的幅值为 0.009 V,第一次回波信号的幅值为 0.028 V,求得经验阈值系数 $x < 0.32$,所以取经验阈值系数 $x = 0.25$ 。由于微分算法要求经验值 $k \geq 1$,同时要求经验值 k 小于纵波周期与采样周期之比的两倍,实验测得纵波周期为 49×10^{-9} s,采样间隔时间为 8×10^{-9} s,求得经验值 $k < 6.125$ 。这里取经验值 $k = 3$,处理结果如图 8 所示。图 8(a)是含有低频趋势项的激光超声测厚信号经过一次微分处理后的波形图。由图可知,微分变化法对激光超声测厚信号中的突变信号敏感,含有低频趋势项的激光超声测厚信号经过微分处理后,1 次、2 次、3 次、4 次、5 次纵波回波的到达时间明显,峰值之间的时间间隔容易提取;但是,激光超声信号经过一次微分后仍残留有低频成分,而且高频噪声得到增强,微分后激光超声测厚信号欠光滑,因此一阶微分的结果并不理想。由图 8(b)得出,二次微分后的信号低频趋势成分被完全消除,各次回波的到达时间易于判断,但是高频噪声比一次微分后的结果更强。图 8(c)是强制去除小幅度干扰和归一化处理后的结果,根据图 8(c)可以准确地得到各次回波的到达时间以及相邻两次回波的时间差。



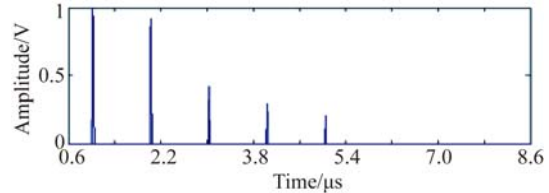
(a)一次微分

(a)First order differential



(b)二次微分

(b)Second order differential



(c)归一化系数

(c)Normalized coefficient

图 8 各阶微分及归一化系数

Fig. 8 Differential results and normalized coefficient

计算相邻两次回波的到达时间得到:1 次、2 次、3 次、4 次、5 次纵波回波的到达时间间隔分别为 0.928, 0.920, 0.928, 0.928 μ s。管道厚度为:

$$T = \frac{\Delta t \times c}{2}, \quad (18)$$

式中: T 表示管道厚度, Δt 表示相邻两次纵波的到达时间间隔, c 表示钢管试件中纵波波速。

为了使结果更加准确,将几次时间间隔的平均值作为最终的 Δt ,求得该检测点的厚度 $T = 2.74$ mm。实际中采用游标卡尺测量管道试件,测得该点厚度 $T_1 = 2.68$ mm,测量精度为 0.02 mm。检测误差为 0.06 mm,由检测误差系数计算公式:

$$\eta = \frac{|T_1 - T|}{T_1} \times 100\%, \quad (19)$$

求得误差系数 $\eta = 2.23\%$ 。

4.2 连续测厚信号微分法特征提取

实验过程中,激光激发点与接收点重合,管道试件在钢管支撑旋转机构的带动下周向旋转,一周采集 80 点,采样频率为 125 MHz,采集点的时间间隔为 8×10^{-9} s。原始激光超声测厚信号经过快速突变点微分算法处理后如图 9 所示,可以观测到各次纵波信号的回波。通过观察各次回波信号到达时间的提前或者延时来判断试件厚度的变化,此方法可用于检测管道腐蚀引起的厚度变

化等缺陷。

以第 4 次回波的到达时间为例,圆周 360°到达时间分别为 $t_{\max} = 3.744 \mu\text{s}$ 、 $t_{\min} = 3.040 \mu\text{s}$, 根据:

$$T = \frac{t \times c}{2n}, \quad (20)$$

式中 n 表示回波次数,求得最大管道壁厚 $T_{\max} = 2.77 \text{ mm}$,最小管道壁厚 $T_{\min} = 2.25 \text{ mm}$ 。

管道壁厚变化为 $\Delta T = 0.402 \text{ mm}$ 。分析实验数据得到,最大壁厚和最小壁厚在第 18 个和第 69 个点,对应角度分别为 80° 和 310° ,实际测量厚度分别为 2.82 mm 和 2.36 mm ,误差分别为 0.05 mm 和 0.11 mm ,误差系数分别为 1.17% 和 4.66% 。

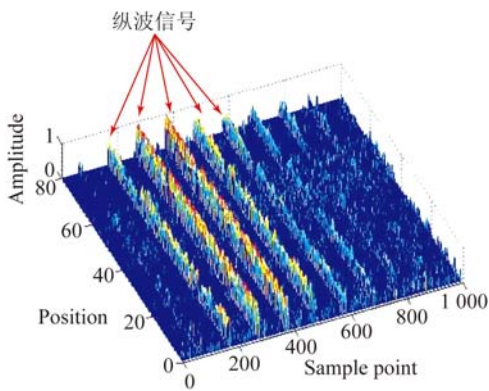


图 9 微分法特征提取结果

Fig. 9 Results of differential feature extraction

4.2.1 经验值 k 对微分结果的影响

为了研究经验值 k 对微分结果的影响,将经验阈值系数设置为 $x = 0.3$,经验值 k 分别取值 $1 \sim 12$,对原始激光超声信号进行微分处理并最后成像,结果如图 10 所示。由图 10 可知,当 $k = 1$ 时,可以观测到各次纵波回波的特征信号,但是图像背景嘈杂,成像结果不理想;当 k 取值为 $2 \sim 6$ 时,背景噪声被有效抑制,各次纵波回波的特征信号随着 k 的增大而趋于明显;当 $k \geq 7$ 时,各次纵波回波的特征信号依然明显,但是背景噪声有增大的趋势。所以 k 一般取 $2 \sim 6$,可以根据需要来选取 k 值。

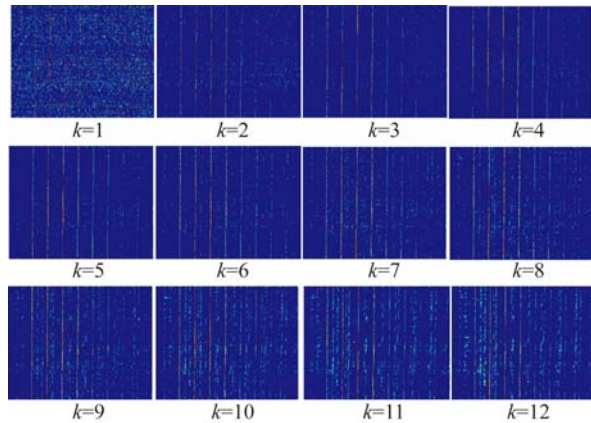


图 10 经验值 k 对微分结果的影响

Fig. 10 Effect of empirical value k on differential results

4.2.2 经验阈值系数 x 对微分结果的影响

为研究经验阈值系数对微分结果的影响,将经验值 k 设置为 5, x 分别取 $0.05 \sim 0.4$,对原始激光超声信号进行微分处理并最后成像,结果如图 11 所示。由图 11 可知,随着经验阈值系数 x 的增大,图像的背景噪声逐渐减少;但是当经验阈值系数 x 太大时,部分有效的纵波回波信号容易被当作噪声去除,因此 $x \leq 0.4$, x 取值太大会造成激光超声信号中大量有用成分的丢失。

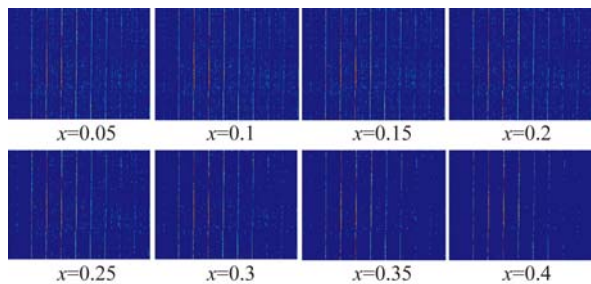


图 11 经验阈值系数 x 对微分结果的影响

Fig. 11 Effect of empirical threshold coefficient x on differential results

5 结 论

本文采用微分法对单点测厚信号进行特征提取,经过二次微分和归一化处理可以清楚地显示各次纵波回波的达到时间,通过相邻纵波回波的时间间隔可以计算出理论检测点的管道壁厚,且

检测误差在 5% 以内。采用微分法对连续测厚信号进行特征提取处理,能够清楚地显示因管道周向厚度不均导致各次纵波回波达到时间的时差,计算出管道周向的厚度差。在采用微分法对信号进行特征提取的过程中,经验值 k 和阈值系数 x 对结果的影响较大, k 取值在 2~6,能有效抑

制背景噪声;阈值系数 x 一般不超过 0.4,以避免丢失信号数据的有用成分。通过微分法对激光超声信号进行特征提取处理计算过程简单、高效,满足检测精度要求,而且对于实际应用中因腐蚀、应力等引发的管道厚度不均匀性也有较好的检测效果。

参考文献:

- [1] 宋寿鹏,李萍萍. 基于卷积模型的超声回波分离技术及其应用[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 1175-1179.
SONG SH P, LI P P. Convolution-mode-based ultrasonic echo separation technology and its application [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(6): 1175-1179. (in Chinese)
- [2] 吴德会,游德海,柳振凉,等. 交流漏磁检测法趋肤深度的机理与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 327-336.
WU D H, YOU D H, LIU ZH L, *et al.*. Mechanism and experimental research on skin depth in AC magnetic flux leakage testing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(2): 327-336. (in Chinese)
- [3] 罗玉昆,罗诗途,罗飞路,等. 激光超声信号去噪的经验模态分解实现及改进[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 479-487.
LUO Y K, LUO SH T, LUO F L, *et al.*. Realization and improvement of laser ultrasonic signal denoising based on empirical mode decomposition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 479-487. (in Chinese)
- [4] 王洪水,徐军,孔令剑,等. 激光超声检测系统设计[J]. 红外与激光工程, 2007(z1): 522-525.
WANG H SH, XU J, KONG L J, *et al.*. Design of the laser-ultrasonic detection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007(z1): 522-525. (in Chinese)
- [5] 王洪超,李亚安. 局部投影降噪算法邻域半径参数的选择研究[J]. 系统仿真实报, 2007, 19(4): 805-807.
WANG H CH, LI Y A. Determination of neighborhood size parameter of local projective algorithm for noise reduction [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(4): 805-807. (in Chinese)
- [6] 迟大钊,刚铁,孙昌立. 基于自适应滤波的超声杂波抑制方法[J]. 焊接学报, 2015, 36(11): 33-36.
CHI D ZH, GANG T, SUN CH L. Ultrasonic clutter suppression method using adaptive filter [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(11): 33-36. (in Chinese)
- [7] 童允,黄松岭,赵伟,等. 基于包络滤波的电磁超声检测数据降噪算法[J]. 高技术通讯, 2010(9): 960-964.
TONG Y, HUANG S L, ZHAO W, *et al.*. An EMAT denoising algorithm based on envelope filtering [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2010(9): 960-964. (in Chinese)
- [8] 龚志强,邹明玮,高新全,等. 基于非线性时间序列分析经验模态分解和小波分解异同性的研究[J]. 物理学报, 2005, 54(8): 3947-3957.
GONG ZH Q, ZHOU M W, GAO X Q, *et al.*. On the difference between empirical mode decomposition and wavelet decomposition in the nonlinear time series [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(8): 3947-3957. (in Chinese)
- [9] 马伦,康建设,孟妍,等. 基于 Morlet 小波变换的滚动轴承早期故障特征提取研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 920-926.
MA L, KANG J SH, MENG Y. *et al.*. Research on feature extraction of rolling bearing incipient fault based on Morlet wavelet transform [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(4): 920-926. (in Chinese)
- [10] 朱浩瀚,秦海琨,张敏,等. 光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 893-897.
ZHU H H, QIN H K, ZHANG M, *et al.*. Peak detection algorithm in the demodulation for the fiber Bragg grating sensor system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(6): 893-897. (in Chinese)
- [11] 陶珂,朱建军. 多指标融合的小波去噪最佳分解尺度选择方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(5): 749-755.

- TAO K, ZHU J J. A hybrid indicator for determining the best decomposition scale of wavelet denoising [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5): 749-755. (in Chinese)
- [12] 吴光文, 王昌明, 包建东, 等. 基于自适应阈值函数的小波阈值去噪方法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(6): 1340-1347.
- WU G W, WANG CH M, BAO J D, *et al.*. A wavelet threshold de-noising algorithm based on adaptive threshold function [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1340-1347. (in Chinese)
- [13] 王发牛, 梁栋, 唐俊, 等. 小波变换模极大值多尺度边缘检测[J]. *仪器仪表学报*, 2006 (z3): 2147-2149.
- WANG F N, LIANG D, TANG J, *et al.*. Multi-scale edge detection based on wavelet modulus maxima [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006 (z3): 2147-2149. (in Chinese)
- [14] 秦旭达, 王太勇, 刘兴荣, 等. 微分处理方法在漏磁检测信号分析中的应用研究[J]. *钢铁*, 2004, 39(2): 67-70.
- QIN X D, WANG T Y, LIU X R, *et al.*. Research on differential algorithm and its application in magnetic flux leakage signal processing [J]. *Iron and Steel*, 2004, 39(2): 67-70. (in Chinese)
- [15] 杨柱中, 周激流, 晏祥玉, 等. 基于分数阶微分的图像增强[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2008, 20(3): 343-348.
- YANG ZH ZH, ZHOU J L, YAN X Y, *et al.*. Image enhancement based on fractional differentials [J]. *Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics*, 2008, 20(3): 343-348. (in Chinese)
- [16] 张东, 塔西甫拉提·特依拜, 张飞, 等. 分数阶微分在盐渍土高光谱数据预处理中的应用[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(24): 151-160.
- ZHANG D, TASHPOLAT · T, ZHANG F, *et al.*. Application of fractional differential in pre-processing hyperspectral data of saline soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(24): 151-160. (in Chinese)
- [17] 靳世久, 王立宁, 李健, 等. 原油管道漏点定位技术[J]. *石油学报*, 1998, 19(3): 105-109
- JIN SH J, WANG L N, LI J, *et al.*. Study on leak point locating of crude oil pipelines [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1998, 19(3): 105-109. (in Chinese)
- [18] 曹建树, 姬保平, 罗振兴, 等. 激光超声信号去噪方法的研究[J]. *激光与红外*, 2016, 46(2): 171-176.
- CAO J SH, JI B P, LUO ZH X, *et al.*. Research on de-noising method for laser ultrasonic signal [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(2): 171-176. (in Chinese)

作者简介:



曹建树(1971—),男,内蒙古丰镇人,博士,副教授,1995年于中国石油大学(华东)获得学士学位,1998年、2014年于中国石油大学(北京)分别获得硕士、博士学位,主要从事管道无损检测方面的研究。E-mail: jianshu@bipt.edu.cn



罗振兴(1991—),男,湖北荆州人,硕士研究生,2014年于北京化工大学获得学士学位,主要从事管道无损检测方面的研究。E-mail:991628069@qq.com