

基于反褶积与编码激励的长输管道损伤检测*

耿艳峰, 王丹, 华陈权

(中国石油大学(华东)信息与控制工程学院 青岛, 266580)

摘要 制约应力波导波技术应用于长输管道损伤检测的两个主要原因是信号处理技术和导波激励技术, 针对应力波频散效应和外界噪声干扰使得管道损伤检测定位精度低的问题, 采用了基于子波估计的反褶积技术处理管道导波测量数据。数值模拟和试验结果均表明, 该方法可以有效地抑制导波频散, 提高了管道损伤检测的定位精度。针对单一激励能量有限、检测信号的信噪比低等问题, 采用了编码激励技术, 设计了两种不同的编码激励信号, 并将其应用到管道纵向导波传播模型中。数值模拟结果表明, 编码激励技术能够有效地提高管道损伤检测的抗干扰能力和分辨率。

关键词 管道损伤检测; 子波估计; 反褶积; 编码激励

中图分类号 TG115; TP277

引言

为了保证长输管道安全、高效地运行, 急需开发快速、准确的管道损伤事先检测技术^[1]。现有长输管道损伤检测技术众多, 按照检测方法的不同分为直接检测和间接检测两种。直接检测方法包括检漏电缆法、传感光缆法、红外线法、探地雷达法和管道爬行机等。间接检测方法包括质量平衡法、负压波检漏法和压力梯度法等。在直接检测方法中广泛采用的是基于漏磁检测和超声波检测技术的管道爬行机, 其特点是需要逐点扫描、检测速度慢。在间接检测方法中广泛采用的是负压波技术, 只能在管道发生损伤之后进行检测定位。针对常规检测技术存在的检测速度慢、只能事后检测等不足, 需要寻找新的检测方法。应力波导波检测技术具有快速、事先检测、施工方便并能实现动态检测等特点, 在管道内外壁缺陷、早期的疲劳断裂检测中有很大的应用价值, 具有潜在解决这一问题的可行性, 近年来得到了研究人员的关注^[2]。目前, 制约应力波导波技术应用于管道损伤检测的两个主要因素是信号处理技术和导波激励技术。

在信号处理技术方面, 常用的方法包括时域波形分析法和频谱分析法。由于应力波导波的频散效应和外界噪声的干扰, 管道损伤定位的精度较低。基于地震勘探技术与导波检测技术具有相同物理模型、相似的边界条件。文献[3]将地震反褶积方法应

用到管道损伤检测信号处理中, 对导波信号进行反褶积计算得到的反射系数序列能相对准确地反映管道的损伤位置信息。文献[3]采用了最小熵反褶积和预测反褶积对管道信号进行了处理, 两种反褶积方法均对导波的频散起到了较好的抑制作用^[4]。这两种反褶积方法的应用条件是: 假设反射系数是随机序列和假设子波为最小相位。两个假设条件在管道的实际损伤模型中较难满足, 限制了反褶积方法在管道损伤检测应用中的应用。笔者通过数值模拟和试验研究, 对基于子波估计的反褶积方法在管道损伤检测中的应用进行了尝试, 并将该方法和文献[4]的预测反褶积方法进行了对比分析, 为反褶积技术应用于管道损伤的导波检测奠定了基础。

在导波激励技术方面, 目前以单次导波激励方式为主。同雷达、地震探测等学科类似, 单次激励都存在抗干扰能力较弱、检测距离和空间分辨率矛盾等问题, 基于通讯领域内编码理论具有抗干扰能力强的特点^[5]。笔者将编码理论应用到管道损伤检测的激励系统中, 建立管道纵向导波一维模型, 对编码激励在管道损伤检测中的应用进行了数值模拟。

1 管道损伤检测的理论基础

1.1 基于应力波技术的管道损伤检测原理

利用应力波导波技术对管道损伤进行检测的基本原理是: 主动激励管道, 引起管道振动, 产生的应

* 国家自然科学基金资助项目(61071041); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2010FL005, ZR2012FM012)
收稿日期: 2012-03-22; 修回日期: 2012-05-25

力波在管道中传播。如果管道是连续均匀介质,则没有波的反射,直到传至管道末端才出现反射信号。如果管道出现不连续界面,如遇到孔洞、裂纹或缺陷等情况就会产生反射波,通过加速度传感器接收激励信号与反射信号。分析采集到的管道应力波信号,确定激励波与反射波之间的时间差,根据导波回波理论对管道损伤进行定位。

1.2 基于子波估计的反褶积技术

理论上,地震记录是子波与地层反射系数的褶积,导波测量数据是子波与管道接头、焊缝、损伤等处产生的反射系数的褶积,所以笔者采用了基于子波估计的反褶积技术处理导波测量数据。该技术的基本思路是:首先,根据采集的应力波信号进行子波估计;然后,利用估计的子波对应应力波信号进行反褶积计算,得到反射系数;最后,根据反射系数对应的时间差确定损伤位置。

1.2.1 地震反褶积原理

地震褶积模型^[6]为

$$s(t) = r(t) * w(t) + n(t) \quad (1)$$

其中: $s(t)$ 为采集信号; $r(t)$ 为地层反射系数; $w(t)$ 为震源子波; $n(t)$ 为噪声;*为卷积符号。

如果求得算子 $b(t)$ 正好是子波 $w(t)$ 的逆,则它与 $s(t)$ 褶积时,可得

$$s(t) * b(t) = [r(t) * w(t) + n(t)] * b(t) \quad (2)$$

其中: $b(t) = w^{-1}(t)$ 。

由于噪声具有随机性,因此 $n(t)$ 与 $b(t)$ 的相关性作用在误差允许的范围内可以忽略,即

$$s(t) * b(t) \approx r(t) * \delta(t) \approx r(t) \quad (3)$$

如果能够求得子波 $w(t)$,进而得到它的逆算子,这样就能得到确定的反射系数 $r(t)$ 。

1.2.2 子波估计原理

子波估计的思路是:首先由采集信号估计子波振幅谱和相位谱两部分,然后通过傅里叶逆变换得到子波。本研究的子波振幅谱提取采用了谱模拟技术,在子波未知的条件下假设子波具有光滑的振幅谱^[7]。设 $|S(\omega)|$ 表示记录数据的振幅谱,构造多项式,使它在最小平方意义下对 $|S(\omega)|$ 进行拟合,并认为这条拟合曲线为子波振幅谱的曲线。多项式的数据表示式为

$$|W(\omega)| = \omega^2 e^{\left(\sum_{n=0}^L a_n \omega^n\right)} \quad (4)$$

其中: L 为多项式阶数; ω 为频率坐标值; a_n 为待求的多项式系数。

$$Q = \sum_{\omega=\omega_1}^{\omega_2} (|W(\omega)| - |S(\omega)|)^2 \quad (5)$$

通过使 Q 值最小,计算 a_n 并得到多项式

$|W(\omega)|$,即为子波的振幅谱。本研究采取了相位分解法估计子波相位谱,基本步骤^[8]如下。

1) 求得子波自相关函数的傅里叶变换

$$|W(\omega)|^2 = R_w(\omega) \quad (6)$$

其中: $R_w(\omega)$ 为子波自相关函数的傅里叶变换。

2) 设 $W(Z)$ 为子波的 Z 变换, k 为 $W(Z)$ 在单位圆内的零点个数, $A(Z)$ 为子波因果最小相位部分 $a(t)$ 的 Z 变换, $C(Z)$ 为 $c(t) = a^{-1}(t)$ 的 Z 变换。已知KYW方程为

$$\sum_{j=0}^{N_c} R_w(\tau - j)c(j) = 0 \quad (\tau = k + 1, k + 2, \dots, k + N_c) \quad (7)$$

解KYW方程得到 $c(t)$,根据 $c(t)$ 得到子波因果最小相位部分 $a(t)$,其中 $N_c = k - 1$ 。

3) 对于有限长子波来说,其 Z 变换的零点个数是有限的,在单位圆内的零点个数 k 也是有限的,因而可以用信息准则函数进行搜索。

4) 根据子波振幅谱和搜索得到的 k 可以得到一个相对应的混合相位子波

$$W(Z) = A(Z)Z^k \tilde{W}(Z^{-1})C(Z^{-1}) \quad (8)$$

$\tilde{w}(t)$ 表示与混合相位子波 $w(t)$ 具有相同振幅谱的最小相位子波,通过希尔伯特变换可求得,其中

$$\begin{cases} \tilde{W}(Z^{-1}) = \sum_{j=0}^k \tilde{w}(j)Z^{-j} & (\tilde{w}(0) = 1) \\ C(Z^{-1}) = \sum_{j=0}^k c(j)Z^{-j} & (c(0) = 1) \end{cases} \quad (9)$$

1.3 编码激励原理

应力波导波技术应用于管道损伤检测时,如果将单次激励改成多次激励,并且多次激励按照一定的编码规律,则形成的激励信号就是一个经过编码的长时间序列。设 $d(t)$ 为一个编码序列,则编码激励信号为

$$S_d(t) = d(t) * w(t) \quad (10)$$

用编码激励信号 $S_d(t)$ 代替单次激励信号 $w(t)$,与反射系数序列卷积得到采集信号 $R_d(t)$,即

$$R_d(t) = S_d(t) * r(t) \quad (11)$$

为了从采集信号中检测出反射系数序列,需要对其进行解码。解码过程^[9]可以表示为:用准确记录的编码激励信号 $S_d(t)$ 与采集信号 $R_d(t)$ 进行互相关计算,最终互相关结果记为 $R_e(t)$ 。

$$R_e(t) = R_d(t) \otimes S_d(t) =$$

$$\text{ACF}\{S_d(t)\} * r(t) + n(t) \otimes S_d(t) \quad (12)$$

其中: \otimes 表示互相关计算;ACF表示自相关函数。

分析式(12)的互相关结果,如果 $\text{ACF}\{S_d(t)\}$ 是一个理想的脉冲函数,则最后的解码结果 $R_e(t)$ 对应于管道的反射序列且无波形扭曲,而振幅与单

次激励相比提高了 $ACF\{S_d(t)\}$ 倍,也就提高了检测结果的分辨率。式(12)中第2项在理想情况下为趋于零的小量。

编码激励信号设计时要从两个方面考虑。第一是分辨率,好的编码信号进行检测时应该具有较高的分辨率,即编码激励信号的自相关函数需要有较窄的主瓣和较小的旁瓣。同时要求编码后的激励信号在时域内不能有较强的周期性,即在频域内不能有较强的离散性。第二是物理实现问题,也就是说设计的编码需要能够物理可实现。

2 反褶积技术应用于管道损伤检测

2.1 基于子波估计的反褶积技术

对基于子波估计的反褶积技术进行数值模拟研究,并将该方法和文献[4]的预测反褶积方法进行比较。设所用子波表达式为

$\omega(t) = \sin(\pi/6 \cdot 4t) e^{(-0.12|t-16|)}$, 数据采样为 0.3 s, 共 300 个采样点。由图 1 可知: 预测反褶积求得的反射系数分辨率较弱, 采用基于子波的反褶积算法可以更好地压缩子波, 图 1(c) 分辨率比图 1(b) 高, 验证了子波反褶积技术的有效性。

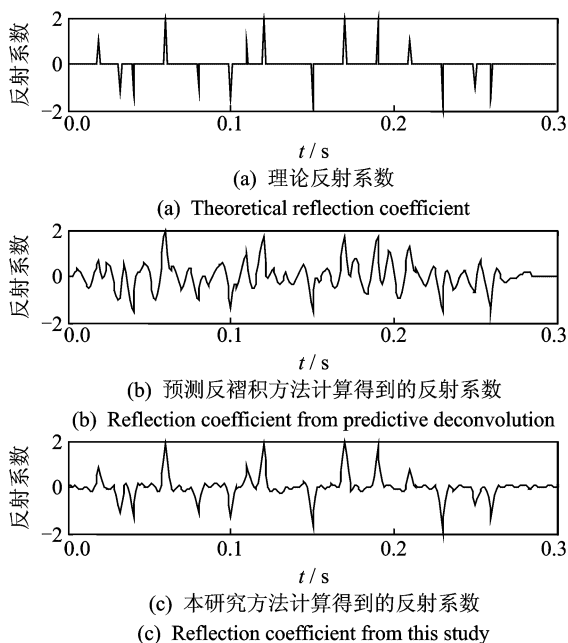


图 1 反射系数

Fig. 1 Reflection coefficient

2.2 基于子波估计的管道导波数据处理

试验采用的钢管外径为 60 mm, 内径为 52 mm, 长度为 4.57 m, 材料为 20 # 钢, 弹性模量 $E =$

206 GPa, 密度 $\rho = 7\ 800\ \text{kg/m}^3$, 泊松比 $\nu = 0.32$ 。管道采用两端简支方式, 传感器为 LC0115 内装 IC 压电加速度传感器。传感器安放在距管道左端 0.6 m 的距离, 管道损伤位置距左端 2.570 m。对于激励装置, 利用沿自制轨道滑落的小钢珠撞击管道端面来激励产生应力波信号, 图 2 为实际采集的管道应力波信号。

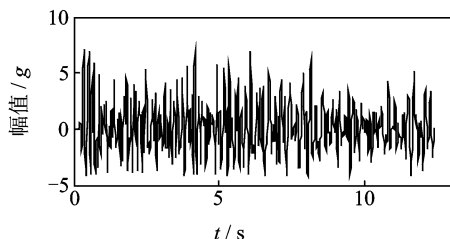


图 2 实际采集的管道应力波信号

Fig. 2 Guided wave signals sampled from real pipes

对采集信号分别采用两种不同的反褶积方法得到反射系数序列如图 3 所示。表 1 为 5 次独立试验后用本研究方法和预测反褶积方法得到的定位距离和误差。

比较图 3(a) 和图 3(b) 可知, 采用基于子波估计的反褶积方法得到的反射系数序列更加尖锐, 分辨率比采用预测反褶积方法得到的分辨率高。分析表 1 可知, 采用基于子波估计的反褶积技术对采集信号进行处理后, 管道损伤定位相对误差比采用预测反褶积技术有所降低, 平均定位误差从 4.802% 降到 1.432%。试验结果表明, 本研究方法对管道损伤信号进行处理, 不仅能够达到较高的分辨率, 而且定位精度得到了有效提高。

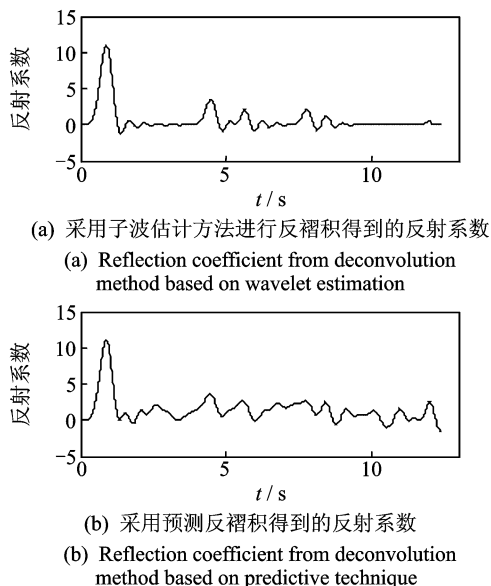


图 3 两种反演方法得到的反射系数对比

Fig. 3 Comparison of reflection coefficients from two kinds of deconvolution methods

表1 两种方法结果对比

Tab.1 Results comparison from two kinds of deconvolution methods

编号	计算结果/m		相对误差/%	
	预测	子波	预测	子波
	反褶积	反褶积	反褶积	反褶积
1	2.705	2.611	5.252	1.595
2	2.717	2.620	5.719	1.945
3	2.681	2.601	4.431	1.206
4	2.690	2.603	4.669	1.284
5	2.674	2.599	4.045	1.128

3 编码激励应用于管道损伤识别

3.1 激励信号传播的数学模型

管道导波理论是建立在均匀、各向同性、完全弹性介质的假定基础上。由于管道导波激励时间短,作用力较小,可以将管道看成完全弹性介质,将管道简化为一维弹性模型。

假设管道材料与试验材料相同,管道长为100 m。管道的端面 $x=0$ m 为激励端面,激励编码信号为 $S_d(t)$ 。管道的另一端 $x=100$ m 是无约束的自由边界,传感器位于 $x=10$ m 处,管道损伤位于 $x=60$ m 处。其他分界面采用衔接条件。

据此建立一维激励信号数学模型为

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = \frac{h}{EA} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (13)$$

边界条件为

$$\begin{cases} t > 0 & (0 < x < 100) \\ \frac{\partial u}{\partial t} |_{t=0} = 0 & (0 \leq x \leq 100) \\ u(x,0) = 0 & (0 \leq x \leq 100) \end{cases} \quad (14)$$

其他参数确定为

$$\begin{cases} c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 5139 \text{ m/s} \\ -EA \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} |_{x=0} = S_d(t) \\ -EA \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} |_{x=L} = 0 \\ v(x_c,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} |_{x=x_c} \end{cases} \quad (15)$$

其中: ρ 为管道材质密度; A 为横截面积; h 为剪切衰减系数, $0 < h < 1$; c_0 为理论波速; E 为弹性模量; $u(x,t)$ 表示 t 时刻管道 x 点处的纵向位移; $v(x_c,t)$ 表示 t 时刻管道 x 点处的纵向速度。

采用差分方法求解为

$$\frac{1}{\Delta x^2} (u_{i+1}^j - 2u_i^j + u_{i-1}^j) - \frac{1}{c_0^2 \Delta t^2} (u_i^{j+1} - 2u_i^j + u_i^{j-1}) = \frac{h}{EA} \frac{1}{\Delta t} (u_i^j - u_i^{j-1}) \quad (16)$$

其中: Δt 为采样时间; $\Delta x = L/n_0$; L 为管道长度; $n_0 < L/(c_0 \Delta t)$ 时差分方程收敛。

根据以上公式可以推导出任意采样时刻管道任意位置导波的纵向位移和速度。

3.2 编码激励技术的数值模拟

常用的编码激励技术有线性编码和伪随机编码两种。分别将这两种编码技术应用到式(13)~(16)的管道模型中,对编码激励的可行性和定位精度进行数值模拟研究。

3.2.1 线性编码激励

线性编码是指对激励信号进行编码时采用线性方式,子波序列之间的时间间隔是按照线性规律变化的,即保持激励信号的频率变化速率在整个激励期间恒定不变。设 t_1 为前两次激励之间的时间间隔,给定时间间隔增量 d_t 和激发次数 N ,则线性编码激励第 n 次激发与第 $n+1$ 次激发的时间间隔为

$$t_n = t_1 + (n-1) * d_t \quad (n=1,2,\dots,N-1) \quad (17)$$

文献[10]指出:当时间间隔增量 d_t 偏大时,得到的采集信号经解码后相关噪声较强;当 d_t 偏小时,会出现其他波形的干扰,因此需要选择适当的增量值 d_t 抑制噪声的干扰。采样时间总长度 t_s 需大于等于波在管道中的双程旅行时间,而 d_t 和 t_1 需小于 t_s ,即

$$t_s \geq 2L/c_0 = 0.0389 \text{ s} \quad (18)$$

$$\begin{cases} d_t \leq t_s \\ t_1 \leq t_s \end{cases} \quad (19)$$

根据式(17)~(19)确定各参数值,并将产生的线性编码激励信号代入管道模型方程式(16)中进行数值模拟。激励信号加在 $x=0$ m 处,基于图2的实测信号与编码方式经数值模拟得到的管道振动信号参见图4(a),采用式(12)的解码原理得到的反射系数如图4(b)所示。由管道的结构可知,图4(b)的前5个脉冲所对应的的时间分别为:直达波到达的时间; $x=60$ m处缺陷反射波到达的时间;缺陷反射波在 $x=0$ m端面产生回波信号到达的时间; $x=100$ m管道端面反射波到达的时间; $x=100$ m端面反射波在 $x=0$ m端面产生回波信号到达时间。根据前5个脉冲所对应的的时间和已知的管道信息,确定管道中应力波波速为5152.2 m/s,而理论波速为5139 m/s,相对误

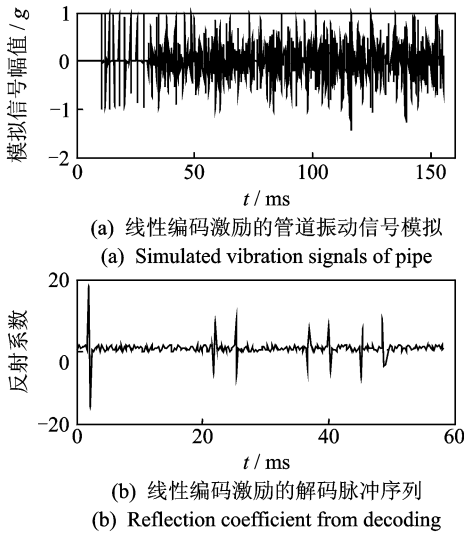


图4 线性编码激励的采集信号和解码信号

Fig.4 The sampled signal and deconvolution result of linear coded excitation

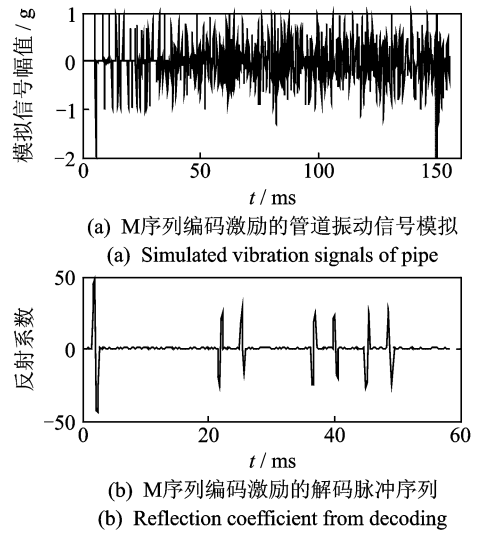


图5 M序列编码激励的采集信号和解码信号

Fig.5 The sampled signal and deconvolution result of M series excitation

差为0.25%，由此可以判断线性编码激励信号用于管道检测是合理的且检测精度较高。

3.2.2 伪随机编码激励

伪随机编码是指对激励信号进行编码时采用伪随机序列的方式。伪随机序列一方面是可以预先确定的，且可以重复产生和复制；另一方面它又具有随机序列的特性^[11]。伪随机序列中由于M序列是二元序列，方便编码，所以笔者采用了M序列进行编码产生激励信号。采用M序列进行编码时首先要确定M序列的参数。设M序列的周期为 t_m ，要求 $t_m \geq t_s = 0.0389$ s。设M序列的移位时钟为0.001 s，当M序列的级数分别为5,6时，周期分别为 $N_5 = 2^5 - 1 = 31$ ， $N_6 = 2^6 - 1 = 63$ ，所以 $t_{m(5)} = 0.001 * 31 = 0.031$ ， $t_{m(6)} = 0.001 * 63 = 0.063$ 。由 $t_{m(5)} < t_s < t_{m(6)}$ 可知：级数6为满足条件的最小值。文献[12]中仿真实验得到，不改变其他条件、只增加序列的级数，激励信号自相关的旁瓣会逐渐较小^[12]，但是增加级数会增大周期长度和存储空间，综合考虑，取级数为7的M序列产生编码激励信号。

由M序列编码激励与图2的实测信号模拟得到的管道振动信号如图5(a)所示。通过式(12)的自相关运算解码得到的脉冲序列如图5(b)所示。图5(b)的前5个脉冲含义与线性编码激励相同，同理可以判断M序列编码激励信号用于管道损伤检测的可行性。由于M序列在一个周期内具有随机性，它的自相关函数接近随机序列的自相关函数，即自相关函数有较窄的主瓣，因此可知相关检测法解码后得到的反射系数序列分辨率高。

3.2.3 单次激励与编码激励的对比分析

为了进一步验证编码激励的效果，分别将单次激励信号、线性编码激励信号和M序列编码激励信号带入管道模型方程中，并叠加信噪比为5 dB的高斯白噪声。对管道振动信号进行处理的结果如图6所示。根据仿真结果计算得到管道损伤定位相对误差分别为0.653%，0.334%，0.332%，3组脉冲的损

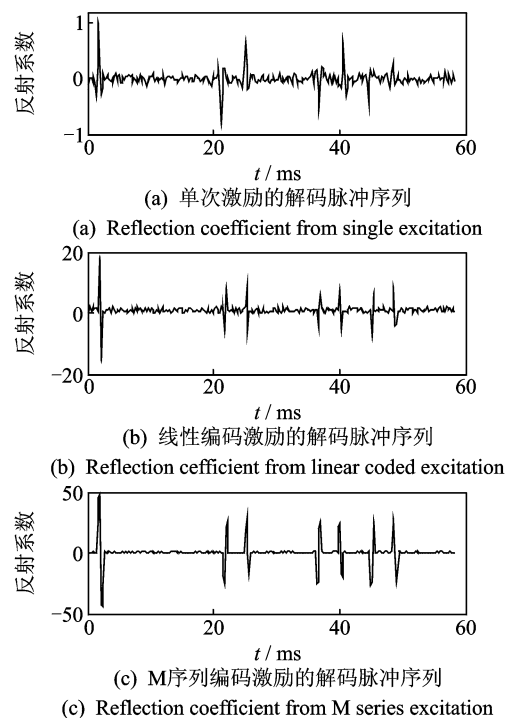


图6 不同激励方法的反射系数对比

Fig.6 Comparison of reflection coefficients from different excitation methods

伤定位相对误差差别不大,但是脉冲系列的峰值强度差别很大。为了定量的表示反射系数序列的脉冲峰值强度,定义参数 A_f 为峰值强度均值,它表示解码脉冲序列中有效脉冲峰值绝对值的均值。 A_f 越大,表明反射脉冲序列的有效脉冲的平均强度越大,越利于区别有效反射脉冲和噪声。图6中3组反射系数序列的 A_f 分别为 0.633, 9.074, 29.653。由此可知:M序列编码激励得到强度均值最大,单次激励技术得到的最小。根据反射系数序列噪声干扰的程度排序,图6(a)的噪声干扰最大,图6(c)的噪声干扰最小。

综上所述:编码激励技术比单次激励的分辨率和抗干扰性高,而M序列编码激励得到的脉冲序列与线性编码激励的脉冲序列比较,M序列编码激励具有更高的分辨率和抗干扰性。

4 结 论

1) 在信号处理技术方面,采用了基于子波估计的反褶积方法对管道应力波信号进行处理。数值模拟和试验数据处理均表明:基于子波估计的反褶积方法不仅克服了原有反褶积方法约束条件在实际中难于满足的缺点,同时提高了管道损伤的定位精度。

2) 在导波激励技术方面,通过建立纵向导波在管道中的传播模型,对两种不同的编码激励技术进行了数值模拟,并将其与单次激励技术进行了比较。数值模拟结果验证了编码激励信号用于管道检测时可以达到较高的分辨率和抗干扰能力。

参 考 文 献

- [1] 刘恩斌,李长俊,梁党国. 输油管道泄漏检测技术与应用[J]. 油气储运, 2006, 25(5):43-44.
Liu Enbin, Li Changjun, Liang Guodang. The research of Wang-Hua oil pipeline leakage detection and location system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2006, 25(5):43-44. (in Chinese)
- [2] Long R, Lowe M, Cawley P. Attenuation characteristics of the fundamental modes that propagate in buried iron water pipes [J]. Ultrasonics, 2003, 41(7):509-519.

- [3] Wang Changfeng, Geng Yanfeng. Minimum entropy deconvolution of guided wave signals in pipe inspection [C]// 2010 International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control. Zibo, China: [s. n.], 2010: 259-262.
- [4] 王昶峰. 基于地震反演技术的管道损伤识别技术研究[D]. 东营:中国石油大学(华东), 2011.
- [5] Hellesteth T. Some results about the cross-correlation function between tow maximal linear sequences [J]. Discrete Math, 1976, 16:209-232.
- [6] 黄绪德. 反褶积与地震道反演[M]. 北京:石油工业出版社, 1992:1-10.
- [7] 唐博文, 赵波, 吴艳辉, 等. 一种实现谱模拟反褶积的新途径[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 11(45):66-70.
Tang Bowen, Zhao Bo, Wu Yanhui, et al. A new way to realize spectral modeling deconvolution[J]. 2010, 11(45): 66-70. (in Chinese)
- [8] 李鲲鹏, 李衍达, 张学工, 等. 基于谱模拟技术的混合相位地震子波估计方法[J]. 石油物探, 2001, 40(2): 21-28.
Li Kunpeng, Li Yanda, Zhang Xuegong, et al. The mixed-phase wavelet estimate method based on spectral modeling[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2001, 40(2):21-28. (in Chinese)
- [9] 金念. 夯击震源地震勘探关键技术研究[D]. 长春:吉林大学, 2006.
- [10] 高建. 脉冲编码可控震源信号设计与系统研究[D]. 长春:吉林大学, 2009.
- [11] Cunningham A. Some alternate vibrator signals[J]. Geophysics, 1979, 44:1901-1921.
- [12] 金昊. 可控震源伪随机扫描技术研究[D]. 长春:吉林大学, 2007.



第一作者简介:耿艳峰,男,1969年5月生,教授。主要研究方向为多相流计量技术、数字信号处理、井下随钻测量仪器开发。

E-mail: gengyf@upc.edu.cn