



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104792865 A

(43) 申请公布日 2015. 07. 22

(21) 申请号 201510145418. 6

(22) 申请日 2015. 03. 30

(71) 申请人 暨南大学

地址 510632 广东省广州市黄埔大道西 601 号

(72) 发明人 马宏伟 武静 张伟伟 杨飞

(74) 专利代理机构 广州市华学知识产权代理有限公司 44245

代理人 陈燕娴

(51) Int. Cl.

G01N 29/04(2006. 01)

F17D 5/06(2006. 01)

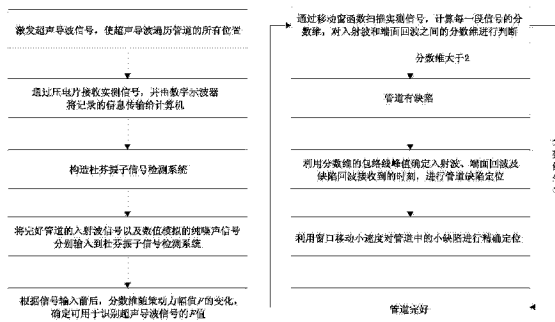
权利要求书3页 说明书9页 附图7页

(54) 发明名称

基于分数维的管道超声导波小缺陷识别与定位方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于分数维的管道超声导波小缺陷识别与定位方法,所述方法包括:通过波形发生器、功率放大器放大和压电环,激发超声导波信号,然后通过压电片接收实测信号,并通过数字示波器记录超声导波在管道中传播的时程曲线;构造杜芬振子信号检测系统;根据分数维随策动力幅值 F 的变化,确定可用于识别超声导波信号的 F 值;定义移动窗函数,通过移动窗函数扫描实测信号,计算每一段信号的分数维,若分数维等于 2,则管道完好;若分数维大于 2,则管道有缺陷,利用分数维的包络线峰值和窗口移动速度  $\tau = 1 \mu s$  进行缺陷定位。本发明方法可以对管道中的不同损伤程度的小缺陷进行有效定位,从而提高了超声导波识别小缺陷的灵敏度、有效地延长了检测范围。



1. 基于分数维的管道超声导波小缺陷识别与定位方法,其特征在于包括以下步骤:

1) 波形发生器生成经 Hanning 窗调制的信号,通过功率放大器放大,再作用于管道一侧端面的压电环,激发经 Hanning 窗调制的超声导波信号,使超声导波遍历管道的所有位置;

2) 通过设置在管道上的压电片接收实测信号,并通过数字示波器记录超声导波在管道中传播的时程曲线,由数字示波器将记录的信息传输给计算机;

3) 设预先采集到的完好管道的入射波信号以及数值模拟的纯噪声信号为检测信号,根据该检测信号的中心频率、采样频率,以及杜芬方程特性,构造杜芬振子信号检测系统;

4) 将预先采集到的完好管道的入射波信号以及数值模拟的纯噪声信号分别输入到杜芬振子信号检测系统,通过比较无信号输入、入射波信号及纯噪声信号时,分数维随策动力幅值  $F$  的变化,确定可用于识别超声导波信号的  $F$  值;

5) 定义移动窗函数,选择窗长度  $2\delta = 50 \mu s$ 、窗口移动速度  $\tau = 5 \mu s$ ,通过移动窗函数扫描实测信号,计算每一段信号的分数维,若入射波和端面回波之间的分数维等于 2,则管道完好;若入射波和端面回波之间的分数维大于 2,则管道有缺陷,进入步骤 6);

6) 利用分数维的包络线峰值确定入射波、端面回波及缺陷回波接收到的时刻,根据三者之间的时间比例关系,进行管道缺陷定位;

7) 利用窗口移动速度  $\tau = 1 \mu s$  对管道中的小缺陷进行精确定位。

2. 根据权利要求 1 所述的基于分数维的管道超声导波小缺陷识别与定位方法,其特征在于:步骤 1) 所述经 Hanning 窗调制的超声导波信号表达式如下:

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

其中,  $n$  为选用的单音频数目,  $w_c = 2\pi f_c$ ,  $f_c$  为实测信号的中心频率,为 70KHz。

3. 根据权利要求 1 所述的基于分数维的管道超声导波小缺陷识别与定位方法,其特征在于:步骤 3) 所述构造杜芬振子信号检测系统,具体如下:

a) 选取杜芬方程,它包括振荡、分岔、混沌的复杂状态,其表达式为:

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x^3 + x^5 = F \cos \omega t \quad (2)$$

其中,  $k$  为阻尼比,  $(-x^3 + x^5)$  为非线性恢复力项;  $F \cos \omega t$  为策动力项,  $F$  是策动力幅值,  $\omega$  为策动力角频率;

b) 设预先采集到的完好管道的入射波信号以及数值模拟的纯噪声信号为检测信号  $\bar{s}(t)$ ,且其中心频率为 70KHz,采样频率为 50M 次/秒,然后设定杜芬方程的  $\omega \approx 0.439823 \text{rad}/\mu s$ ,积分步长  $h = 0.02 \mu s$ ,阻尼比  $k = 0.5$ ,将  $\bar{s}(t)$  输入系统 (1) 后得:

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x^3 + x^5 = F \cos \omega t + \bar{s}(t) \quad (3)$$

杜芬振子信号检测系统即构造完成。

4. 根据权利要求 3 所述的基于分数维的管道超声导波小缺陷识别与定位方法,其特征在于:步骤 5) 所述分数维的定义具体如下:

a) 对于  $n$  维连续动力系统  $\dot{x} = F(x)$ ,在  $t = 0$  时刻,以  $x_0$  为中心,  $\|\delta x(x_0, 0)\|$  为半径做一个  $n$  维的球面;随着时间的演化,在  $t$  时刻该球面即变形为  $n$  维的椭球面,设该椭球

面的第  $i$  个坐标轴方向的半轴长为,则该系统第  $i$  个 Lyapunov 指数为:

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{\|\delta x_i(x_0, t)\|}{\|\delta x_i(x_0, 0)\|} \quad (4)$$

$n$  维系统,对应  $n$  个 Lyapunov 指数值,只要存在一个 Lyapunov 指数大于 0,就说明系统处于混沌状态,将式 (3) 表示的二维非自治杜芬振子信号检测系统改写为三维自治系统,如下式:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= v \\ \dot{v} &= -kv + x^3 - x^5 + F \cos(\omega z) + \bar{s}(z) \\ \dot{z} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

利用式 (4) 分别计算出杜芬振子信号检测系统对应的三个 Lyapunov 指数  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$ ;

b) 根据上述将计算出的 Lyapunov 指数,得到了一种分数维的定义,如下:

$$D = j + \frac{\sum_{i=1}^j \lambda_i}{|\lambda_{j+1}|} \quad (6)$$

其中,满足  $\sum_{i=1}^j \lambda_i > 0, \sum_{i=1}^{j+1} \lambda_i < 0$ ;再定义周期运动及准周期运动对应的分数维为 2。

5. 根据权利要求 1 所述的基于分数维的管道超声导波小缺陷识别与定位方法,其特征在于:步骤 5) 所述移动窗函数的定义如下:

$$S^* = g(t - n\tau)S \quad (7)$$

$$g(t - n\tau) = 1, t \in (n\tau - \delta, n\tau + \delta), n = \frac{\delta}{\tau}, \frac{\delta + \tau}{\tau}, \frac{\delta + 2\tau}{\tau}, \dots, \frac{N - \delta}{\tau} \quad (8)$$

其中, $S$  表示记录下的全时域信号, $S^*$  表示截取信号, $N$  表示信号长度, $2\delta$  表示窗长度, $\tau$  表示窗口移动速度。

6. 根据权利要求 1 所述的基于分数维的管道超声导波小缺陷识别与定位方法,其特征在于:步骤 6) 所述进行管道缺陷定位采用下式计算:

$$d_x = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} d \quad (9)$$

其中, $d_x$  表示管中缺陷离激发端的距离, $d$  表示管道长度, $t_1$ 、 $t_2$  和  $t_3$  分别表示入射波、缺陷回波和端面回波接收到的时刻。

7. 根据权利要求 1 所述的基于分数维的管道超声导波小缺陷识别与定位方法,其特征在于:步骤 7) 所述利用窗口移动速度  $\tau = 1 \mu s$  对管道中的小缺陷进行精确定位,具体如下:

先利用分数维峰值给出窗口移动速度  $\tau = 1 \mu s$  时,中间位置的回波时刻,再根据频散曲线计算出的传播速度,结合下式对管道中的小缺陷进行精确定位:

$$2d = ct \quad (10)$$

其中, $c$  为根据频散曲线计算出的传播速度, $t$  表示接收到的波的时刻, $d$  表示  $t$  时刻管

道位置离激发端的距离。

## 基于分数维的管道超声导波小缺陷识别与定位方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种超声导波检测技术,尤其是一种基于分数维的管道超声导波小缺陷识别与定位方法,属于无损检测技术领域。

### 背景技术

[0002] 近年来,管道广泛应用于各个行业,已经成为继铁路、公路、航空运输、水运之后的第五大运输工具。然而,由于管道事故频发,对管道进行健康监测变得十分必要。近年来,超声导波检测技术成为长距离管线检测新颖技术。与传统超声波检测技术相比,超声导波沿着波导结构长度方向激发,其检测范围是“线”而非“点”,检测范围可达 50 ~ 100 米,已经成为长距离管线检测的重要方法。

[0003] 目前,针对超声导波的检测技术有很多,主要可分为三大部分:一、超声导波在管道结构中的传播特性研究,如不同管道特征中及不同服役条件下的频散特性研究、衰减特性研究、传播模态与模态转换研究等;二、超声导波的激发和接收装置研究,如压电效应,磁致伸缩效应及基于脉冲激光式导波传感器设计与应用研究等;三、信号分析与缺陷特征提取,如小波变换,快速FFT,缺陷参数识别等。相关文献表明在上述三个方面已有丰富的研究成果。但在超声导波检测技术的工业应用中,仍存在一些问题。尤其是对于一些充液管道、埋地管道等实际管道,进行激发,由于这些管道特征,使得接收到的信号即使是在较大缺陷下也大多很难看到明显的缺陷回波信号,还有一些长距离,小缺陷下的回波信号也很难被观察到,因此,国内外研究学者越来越重视对超声导波信号的分析和研究,并且发展了许多有效的方法。混沌系统由于具有初值敏感性,若将弱信号作为混沌系统的初值输入到系统中,从混沌系统的响应中可以有效的识别出弱信号,并且有效降低了信噪比门限,提高了检测灵敏度。因此,基于混沌系统的微弱信号检测技术引起了研究人员的重视。

[0004] 常用的混沌检测系统主要有 Lorenz 系统和 Duffing 系统。有许多研究学者基于非共振参数激励混沌抑制原理,利用受控 Lorenz 系统实现强噪声背景下微弱谐波和信号的检测。然而,近年来,基于 Duffing 振子的微弱周期信号检测方法得到了深入研究。最初是由 1992 年美国 Dayton 大学的 Donald. L. Birx 博士开展的,由于当时有关基础理论尚不完善而缺乏深入理论研究。随后,研究学者利用对非自治杜芬混沌系统的参数共振微扰来实现检测,并且开展了基于混沌检测技术的系统统计特性、弱信号周期检测、未知频率检测、信号振幅估计等相关研究,但大部分围绕着周期和谐波信号。现在也有越来越多的学者利用杜芬混沌系统进行弱超声导波信号的识别。但大多集中在利用定性指标相轨迹图对导波信号的识别,而进一步对小缺陷管道定位显得更为迫切。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是为了解决传统超声波检测技术的缺陷,提供一种基于分数维的管道超声导波小缺陷识别与定位方法,该方法可以对管道中的不同损伤程度的小缺陷进行有效定位,从而提高了超声导波识别小缺陷的灵敏度、有效地延长了检测范围。

[0006] 本发明的目的可以通过采取如下技术方案达到：

[0007] 基于分数维的管道超声导波小缺陷识别与定位方法，包括以下步骤：

[0008] 1) 波形发生器生成经 Hanning 窗调制的信号，通过功率放大器放大，再作用于管道一侧端面的压电环，激发经 Hanning 窗调制的超声导波信号，使超声导波遍历管道的所有位置；

[0009] 2) 通过设置在管道上的压电片接收实测信号，并通过数字示波器记录超声导波在管道中传播的时程曲线，由数字示波器将记录的信息传输给计算机；

[0010] 3) 设预先采集到的完好管道的入射波信号以及数值模拟的纯噪声信号为检测信号，根据该检测信号的中心频率、采样频率，以及杜芬方程特性，构造杜芬振子信号检测系统；

[0011] 4) 将预先采集到的完好管道的入射波信号以及数值模拟的纯噪声信号分别输入到杜芬振子信号检测系统，通过比较无信号输入、入射波信号及纯噪声信号时，分数维随策动力幅值  $F$  的变化，确定可用于识别超声导波信号的  $F$  值；

[0012] 5) 定义移动窗函数，选择窗长度  $2\delta = 50 \mu s$ 、窗口移动速度  $\tau = 5 \mu s$ ，通过移动窗函数扫描实测信号，计算每一段信号的分数维，若入射波和端面回波之间的分数维等于 2，则管道完好；若入射波和端面回波之间的分数维大于 2，则管道有缺陷，进入步骤 6)；

[0013] 6) 利用分数维的包络线峰值确定入射波、端面回波及缺陷回波接收到的时刻，根据三者之间的时间比例关系，进行管道缺陷定位；

[0014] 7) 利用窗口移动速度  $\tau = 1 \mu s$  对管道中的小缺陷进行精确定位。

[0015] 作为一种实施方案，步骤 1) 所述经 Hanning 窗调制的超声导波信号表达式如下：

$$[0016] \quad s(t) = \left[ \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{w_c t}{n} \right) \right] \cdot \sin(w_c t) \quad (1)$$

[0017] 其中， $n$  为选用的单音频数目， $w_c = 2\pi f_c$ ， $f_c$  为实测信号的中心频率，为 70KHz。

[0018] 作为一种实施方案，步骤 3) 所述构造杜芬振子信号检测系统，具体如下：

[0019] a) 选取杜芬方程，它包括振荡、分岔、混沌的复杂状态，其表达式为：

$$[0020] \quad \ddot{x} + k\dot{x} - x^3 + x^5 = F \cos \omega t \quad (2)$$

[0021] 其中， $k$  为阻尼比， $(-x^3+x^5)$  为非线性恢复力项； $F \cos \omega t$  为策动力项， $F$  是策动力幅值， $\omega$  为策动力角频率；

[0022] b) 设预先采集到的完好管道的入射波信号以及数值模拟的纯噪声信号为检测信号  $\bar{s}(t)$ ，且其中心频率为 70KHz，采样频率为 50M 次/秒，然后设定杜芬方程的  $\omega \approx 0.439823 \text{rad}/\mu s$ ，积分步长  $h = 0.02 \mu s$ ，阻尼比  $k = 0.5$ ，对式 (2) 改进如下：

$$[0023] \quad \ddot{x} + k\dot{x} - x^3 + x^5 = F \cos \omega t + \bar{s}(t) \quad (3)$$

[0024] 作为一种实施方案，步骤 5) 所述分数维的定义具体如下：

[0025] a) 对于  $n$  维连续动力系统  $\dot{x} = F(x)$ ，在  $t = 0$  时刻，以  $x_0$  为中心， $\|\delta_0(x_0, 0)\|$  为半径做一个  $n$  维的球面；随着时间的演化，在  $t$  时刻该球面即变形为  $n$  维的椭球面，设该椭球面的第  $i$  个坐标轴方向的半轴长为  $\rho_i$ ，则该系统第  $i$  个 Lyapunov 指数为：

$$[0026] \quad \lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{\|\delta x_i(x_0, t)\|}{\|\delta x_i(x_0, 0)\|} \quad (4)$$

[0027] n 维系统, 对应 n 个 Lyapunov 指数值, 只要存在一个 Lyapunov 指数大于 0, 就说明系统处于混沌状态, 将式 (3) 表示的二维非自治杜芬振子信号检测系统改写为三维自治系统, 如下式:

$$[0028] \quad \left. \begin{aligned} \dot{x} &= v \\ \dot{v} &= -kv + x^3 - x^5 + F \cos(\omega z) + \bar{f}(z) \\ \dot{z} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

[0029] 利用式 (4) 分别计算出杜芬振子信号检测系统对应的三个 Lyapunov 指数  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$ ;

[0030] b) 根据上述将计算出的 Lyapunov 指数, 得到了一种分数维的定义, 如下:

$$[0031] \quad D = j + \frac{\sum_{i=1}^j \lambda_i}{|\lambda_{j+1}|} \quad (6)$$

[0032] 其中, 满足  $\sum_{i=1}^j \lambda_i > 0$ ,  $\sum_{i=1}^{j+1} \lambda_i < 0$ ; 再定义周期运动及准周期运动对应的分数维为 2。

[0033] 作为一种实施方案, 步骤 5) 所述移动窗函数的定义如下:

$$[0034] \quad S^* = g(t - n\tau) S \quad (7)$$

$$[0035] \quad g(t - n\tau) = 1, t \in (n\tau - \delta, n\tau + \delta), \quad n = \frac{\delta}{\tau}, \frac{\delta + \tau}{\tau}, \frac{\delta + 2\tau}{\tau}, \dots, \frac{N - \delta}{\tau} \quad (8)$$

[0036] 其中, S 表示记录下的全时域信号,  $S^*$  表示截取信号, N 表示信号长度,  $2\delta$  表示窗长度,  $\tau$  表示窗口移动速度。

[0037] 作为一种实施方案, 步骤 6) 所述进行管道缺陷定位采用下式计算:

$$[0038] \quad d_x = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} d \quad (9)$$

[0039] 其中,  $d_x$  表示管中缺陷离激发端的距离, d 表示管道长度,  $t_1$ 、 $t_2$  和  $t_3$  分别表示入射波、缺陷回波和端面回波接收到的时刻。

[0040] 作为一种实施方案, 步骤 7) 所述利用窗口移动速度  $\tau = 1 \mu s$  对管道中的小缺陷进行精确定位, 具体如下:

[0041] 先利用分数维峰值给出窗口移动速度  $\tau = 1 \mu s$  时, 中间位置的回波时刻, 再根据频散曲线计算出的传播速度, 结合下式对管道中的小缺陷进行精确定位:

$$[0042] \quad 2d = ct \quad (10)$$

[0043] 其中, c 为根据频散曲线计算出的传播速度, t 表示接收到的波的时刻, d 表示 t 时刻管道位置离激发端的距离。

[0044] 本发明相对于现有技术具有如下的有益效果:

[0045] 1、本发明是基于分数维的管道超声导波小缺陷识别与定位方法, 可以提高小缺陷检测灵敏度, 并有效定位小缺陷位置, 具有创新意义, 有着广泛的应用前景。

[0046] 2、本发明对管道中的小缺陷反射得到的微弱超声导波信号检测时,通过选择杜芬振子信号检测系统的策动力值,然后根据计算出的分数维的大小,就可以很容易的看出系统是否进入混沌状态,从而说明是否有缺陷回波信号,进而完成缺陷识别。

[0047] 3、本发明根据分数维的包络线峰值给出了缺陷时刻,进而可算出缺陷位置,完成缺陷定位,还可以在窗口长度  $2\delta = 50\mu\text{s}$ 、窗口移动速度  $\tau = 5\mu\text{s}$  的移动窗函数扫描整体信号的情况下,利用窗口移动速度  $\tau = 1\mu\text{s}$  对管道中的小缺陷进行精确定位。

## 附图说明

[0048] 图1为本发明实施例1所采用的仪器原理框图。

[0049] 图2为本发明实施例1的管道超声导波小缺陷识别与定位方法流程图。

[0050] 图3为本发明实施例2的完好管道入射波及数值模拟的纯噪声信号输入杜芬振子信号检测系统前后分数维随策动力F变化的影响图。

[0051] 图4为本发明实施例2的移动窗函数示意图。

[0052] 图5a为本发明实施例2的工况一的分数维和时程曲线示意图;图5b为本发明实施例2的工况二的分数维和时程曲线示意图;图5c为本发明实施例2的工况三的分数维和时程曲线示意图;图5d为本发明实施例2的工况四的分数维和时程曲线示意图。

[0053] 图6为误差r随 $2\delta$ 变化的曲线图。

[0054] 图7为本发明实施例2的分数维随信号长度的变化曲线图。

[0055] 图8为本发明实施例2的频散曲线图。

[0056] 图9a为本发明实施例2的工况二不同窗口移动速度的定位结果图;图9b为本发明实施例2的工况三不同窗口移动速度的定位结果图。

## 具体实施方式

[0057] 实施例1:

[0058] 如图1所示,本实施例所采用的仪器包括波形发生器、功率放大器、数字示波器、压电环和压电片,所述压电环设置在管道一侧端面,所述压电片设置在管道上,所述波形发生器、功率放大器和压电环依次连接,所述波形发生器和压电片分别与数字示波器连接,所述数字示波器与计算机连接。

[0059] 如图2所述,本实施例的管道超声导波小缺陷识别与定位方法包括以下步骤:

[0060] 1) 波形发生器生成经Hanning窗调制的信号,通过功率放大器放大,再作用于管道一侧端面的压电环,激发经Hanning窗调制的超声导波信号,使超声导波遍历管道的所有位置;

[0061] 2) 通过管道上的压电片接收实测信号,并通过数字示波器记录超声导波在管道中传播的时程曲线,由数字示波器将记录的信息传输给计算机;

[0062] 3) 设预先采集到的完好管道的入射波信号以及数值模拟的纯噪声信号为检测信号,根据该检测信号的中心频率、采样频率,以及杜芬方程特性,构造杜芬振子信号检测系统;

[0063] 4) 将预先采集到的完好管道的入射波信号以及数值模拟的纯噪声信号分别输入到杜芬振子信号检测系统,通过比较无信号输入、入射波信号及纯噪声信号时,分数维随策



动力幅值  $F$  的变化,确定可用于识别超声导波信号的  $F$  值;

[0064] 5) 定义移动窗函数,选择窗长度  $2\delta = 50\mu\text{s}$ 、窗口移动速度  $\tau = 5\mu\text{s}$ ,通过移动窗函数扫描实测信号,计算每一段信号的分数量,若入射波和端面回波之间的分数量等于 2,则管道完好;若入射波和端面回波之间的分数量大于 2,则管道有缺陷,进入步骤 6);

[0065] 6) 利用分数量的包络线峰值确定入射波、端面回波及缺陷回波接收到的时刻,根据三者之间的时间比例关系,进行管道缺陷定位;

[0066] 7) 利用窗口移动小速度 ( $\tau = 1\mu\text{s}$ ) 对管道中的小缺陷进行精确定位。

[0067] 实施例 2:

[0068] 本实施例以具体实验为例,在实验室对管道进行超声导波小缺陷识别与定位,具体实施过程如下:

[0069] 1) 管道选用  $3\text{mm}\times 50.75\text{mm}\times 2.32\text{mm}$  的钢管,所述压电环和压电片均采用 PZT5 材料,其中压电环的尺寸根据管道截面制造,压电片尺寸为  $15.4\text{mm}\times 3.2\text{mm}\times 0.9\text{mm}$ ,分别用四条管道设置四种工况,其中工况一是无缺陷的完好管道,工况二、三和四都是利用锯弓在距离压电片所在激发端的  $1.5\text{m}$  处设置人工缺陷,具体参数如下表 1 所示。

[0070]

工况	裂纹环向尺寸 $\theta$	裂纹深度 $a$	截面减少率%
一	无	无	0%
二	$\pi/8$	1mm	4%
三	$\pi/8$	2mm	8%
四	$\pi/4$	2mm	16%

[0071] 表 1 四种工况缺陷设置表

[0072] 2) 波形发生器生成经 Hanning 窗调制的信号,通过功率放大器放大,再作用于四种工况的管道一侧端面的压电环,激发经 Hanning 窗调制的超声导波信号,使超声导波遍历管道的所有位置;

[0073] 经 Hanning 窗调制的超声导波信号的表达式如下:

$$[0074] \quad s(t) = \left[ \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{w_c t}{n} \right) \right] \cdot \sin(w_c t) \quad (1)$$

[0075] 其中,  $n$  为选用的单音频数目,  $w_c = 2\pi f_c$ ,  $f_c$  为实测信号的中心频率,为 70KHz。

[0076] 3) 通过管道上的压电片接收四种工况的实测信号,并通过数字示波器记录超声导波在管道中传播的时程曲线,由数字示波器将记录的信息传输给计算机;

[0077] 4) 构造杜芬振子信号检测系统

[0078] a) 选取杜芬方程,杜芬方程是微弱信号检测中的常用模型,它所描述的非线性系统表现出多种非线性特性,包括振荡、分岔、混沌的复杂状态,其表达式为:

$$[0079] \quad \ddot{x} + k\dot{x} - x^3 + x^5 = F \cos \omega t \quad (2)$$

[0080] 其中,  $k$  为阻尼比,  $(-x^3+x^5)$  为非线性恢复力项;  $F \cos \omega t$  为策动力项,  $F$  是策动力幅值,  $\omega$  为策动力角频率;

[0081] b) 设实验室采集到的完好管道的入射波信号以及数值模拟的纯噪声信号为

检测信号  $\bar{s}(t)$ ，且其中心频率为 70KHz，采样频率为 50M 次 / 秒，然后设定杜芬方程的  $\omega \approx 0.439823\text{rad}/\mu\text{s}$ ，积分步长  $h = 0.02\mu\text{s}$ ，阻尼比  $k = 0.5$ ，对式 (2) 改进如下：

$$[0082] \quad \ddot{x} + k\dot{x} - x^3 + x^5 = F \cos \omega t + \bar{s}(t) \quad (3)$$

[0083] 至此，杜芬振子信号检测系统构造完成。利用简单的三角变换，式 (3) 仍可化简归为式 (2) 的形式。因此，可以认为输入同周期的正弦（或余弦）信号，相当于改变了式 (2) 策动力项的幅值和相位，引起系统输出特征的变化，从而实现对输入信号  $\bar{s}(t)$  的分析。

[0084] 5) 定义分数维

[0085] a) Lyapunov 指数的计算

[0086] 混沌系统的基本特征是运动对初值条件极为敏感，两个靠近的初值所产生的轨道随时间推移按指数方式分离，Lyapunov 指数是描述这一现象的定量指标，表征了系统在相空间中相邻轨道间随着时间的推移收敛或发散的指数率。

[0087] 对于  $n$  维连续动力系统  $\dot{x} = F(x)$ ，在  $t = 0$  时刻，以  $x_0$  为中心， $\|\delta x(x_0, 0)\|$  为半径做一个  $n$  维的球面；随着时间的演化，在  $t$  时刻该球面即变形为  $n$  维的椭球面，设该椭球面的第  $i$  个坐标轴方向的半轴长为  $\|\delta x_i(x_0, t)\|$ ，则该系统第  $i$  个 Lyapunov 指数为：

$$[0088] \quad \lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{\|\delta x_i(x_0, t)\|}{\|\delta x_i(x_0, 0)\|} \quad (4)$$

[0089]  $n$  维系统，对应  $n$  个 Lyapunov 指数值，只要存在一个 Lyapunov 指数大于 0，就说明系统处于混沌状态，将式 (3) 表示的二维非自治杜芬振子信号检测系统构成三维自治系统，如下式：

$$[0090] \quad \left. \begin{aligned} \dot{x} &= v \\ \dot{v} &= -kv + x^3 - x^5 + F \cos(\omega z) + \bar{s}(z) \\ \dot{z} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

[0091] 利用式 (4) 分别计算出杜芬振子信号检测系统对应的三个 Lyapunov 指数  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$ ；

[0092] b) 由于混沌运动非常复杂，很难利用整数维去定义，本专利分维数检测技术主要依据是混沌运动自身所具有的某种能以相对较少的自由度进行合理描述的潜在秩序。根据上述将计算出的 Lyapunov 指数，得到了一种分数维的定义，如下：

$$[0093] \quad D = j + \frac{\sum_{i=1}^j \lambda_i}{|\lambda_{j+1}|} \quad (6)$$

[0094] 其中，满足  $\sum_{i=1}^j \lambda_i > 0$ ， $\sum_{i=1}^{j+1} \lambda_i < 0$ 。由于此定义不适用于周期运动以及准周期运动，再定义周期运动及准周期运动对应的分数维为 2。

[0095] 随策动力  $F$  的变化，Lyapunov 指数及分数维也发生变化，其对应的各运动状态，如下表 2 所示。

[0096]

Lyapunov 指数	取值	分数维	对应状态
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	-, -, -	2	稳定不动点
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	-, 0, -	2	极限环
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	0, 0, -	2	二维环面
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	+, 0, -	>2	奇怪吸引子

[0097] 表 2 杜芬振子信号检测系统与 Lyapunov 指数、分数维之间的关系

[0098] 6) 将接收到的工况一(即完好管道)的入射波信号以及数值模拟的纯噪声信号分别输入到杜芬振子信号检测系统,即式(3),纯噪声信号用  $\sigma e(t)$  表示,其中  $e(t)$  为一随机函数模拟噪声,  $\sigma$  为噪声水平,此处为 0.05,并绘出加入这些信号前后分数维随策动力  $F$  变化的影响图,如图 3 所示;在  $F \in (0.5, 0.52)$  范围内,无信号输入及输入纯噪声信号,分数维均为 2,表示系统为周期运动或者准周期运动,而输入接收到的入射波及端面回波信号,分数维大于 2,表示此时系统为混沌状态,并且选择分数维最大处的策动力  $F = 0.516$  进行超声导波信号的识别。

[0099] 7) 利用移动窗函数进行不同工况下的缺陷管道进行缺陷识别与定位

[0100] a) 移动窗函数的定义如下:

$$[0101] \quad S^* = g(t - n\tau)S \quad (7)$$

$$[0102] \quad g(t - n\tau) = 1, t \in (n\tau - \delta, n\tau + \delta), \quad n = \frac{\delta}{\tau}, \frac{\delta + \tau}{\tau}, \frac{\delta + 2\tau}{\tau}, \dots, \frac{N - \delta}{\tau} \quad (8)$$

[0103] 其中,  $S$  表示记录下的全时域信号,  $S^*$  表示截取信号,  $N$  表示信号长度,  $2\delta$  表示窗长度,  $\tau$  表示窗口移动速度。

[0104] b) 移动窗函数扫描信号

[0105] 利用移动窗函数扫描四种工况下的信号,其扫描的示意图如图 4 所示,分别选择  $2\delta = 50 \mu s$ ,  $\tau = 5 \mu s$  (在下面会对选择这两个参数的理由进行分析),即计算每一段信号的分数维,为了比较利用这种方法缺陷识别与定位的准确程度,将计算出的分数维以及数字示波器上接收到的时程曲线(时间历程曲线)同时作出,并作出分数维的包络线,四种工况分别如图 5a ~ 5d 所示;从图 5a 中可以看出,工况一是完好管道,由于没有缺陷,仅在入射波和端面回波处,分数维大于 2,入射波和端面回波之间的分数维等于 2;从图 5b 可以看出,工况二由于缺陷比较小,在时程曲线上无法判别出缺陷回波,而通过计算出的中间部分的分数维大于 2,可以确定缺陷的存在,由于只要存在弱信号,即使信号不完整也会使得分数维变为明显大于 2,因此计算出的分数维大于 2 的时间区域是一个范围;从图 5c 和图 5d 可以看出,工况三和工况四由于缺陷比较大,在时程曲线上能明显判别出缺陷回波,此处不再赘述。

[0106] c) 缺陷定位

[0107] 通过图 5a ~ 5d 计算得到的分数维,由于涉及时间范围比较宽,不利于精确定位;在本实施例中,可以选择两种方法进行波导时刻的精确确定,一种方法是选择分数维的包络线峰值处,作为波到时刻;另一种是通过分数维的包络线中心位置作为波到时刻,其中缺

陷位置及误差百分比,根据下列公式计算:

$$[0108] \quad d_x = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} d \quad (9)$$

$$[0109] \quad r = \left| \frac{2d_x - d}{2d} \right| \times 100\% \quad (10)$$

[0110] 其中,  $d_x$ 表示管中缺陷离激发端的距离,  $d$ 表示管道长度,  $t_1$ 、 $t_2$ 和  $t_3$ 分别表示入射波、缺陷回波和端面回波接收到的时刻,  $r$ 表示相对误差。计算结果如下表3所示,从表中可以看到选择分数维的包络线峰值处作为波到时刻的误差较小,因此在以后的缺陷定位中都采用这种方法进行定位。

[0111]

case	$t_1$ ( $\mu s$ )	$t_2$ ( $\mu s$ )	$t_3$ ( $\mu s$ )	缺陷位置	误差	备注
case 1	50.68		1180			实际波形
case 2	47.24		1190			实际波形
	-9	591	1255	1.5196	5.06%	包络峰值
	101	591	1205	1.6668	11.23%	包络中心
case 3	33.56	594.56	1160	1.5059	0.39%	实际波形
	35	585	1145	1.5135	0.9%	包络峰值
	35	585	1235	1.5897	5.98%	包络中心
case 4	33.8	598.2	1170	1.5098	0.65%	实际波形
	28	563	1185	1.6128	7.52%	包络峰值
	98	613	1255	1.6646	10.98%	包络中心

[0112] 表3 四种工况下的缺陷定位

[0113] d) 考虑信号长度、 $2\delta$ 和  $\tau$ 对缺陷定位的影响

[0114] 首先研究不同 $2\delta$ 时,进行缺陷定位(选择分数维的包络线峰值处作为波到时刻)得到的误差分析如图6所示,当窗长为 $50\mu s$ ,误差 $r$ 最小,即损伤定位效果最好。

[0115] 为了选择合适的,选择不同的信号长度,并计算其分数维,如图7所示,可以看出,信号长度大于等于 $10\mu s$ 时,其对应的分数维大于2,因此,只需要窗移动速度小于 $10\mu s$ 即可,考虑到效率问题,选择 $\tau = 5\mu s$ 进行整体信号的扫描,然后利用小速度如 $\tau = 1\mu s$ ,给出精确定位,具体为:以工况二、三为例,先利用分数维峰值给出 $\tau = 1\mu s$ 时,中间位置的回波时刻,再根据如图8所示的频散曲线计算出的传播速度,结合下式:

$$[0116] \quad 2d = ct \quad (11)$$

[0117] 其中,  $c$ 为根据频散曲线计算出的传播速度,即 $c = 5330.58m/s$ ,  $t$ 表示接收到的波的时刻,  $d$ 表示 $t$ 时刻管道位置离激发端的距离;以 $2d$ 为横坐标,分数维为纵坐标,作出工况二和工况三中间位置在两种窗口移动速度( $1\mu s$ 和 $5\mu s$ )下的定位结果,如图9a和9b所示;从而可以说明,小速度 $\tau = 1\mu s$ 接近缺陷位置。因此,选择大速度扫描、小速度精确定位的方法对管道中的小缺陷进行定位。

[0118] 综上所述,本发明方法可以对管道中的不同损伤程度的小缺陷进行有效定位,从而提高了超声导波识别小缺陷的灵敏度、有效地延长了检测范围。

[0119] 以上所述,仅为本发明专利较佳的实施例,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明所公开的范围内,根据本发明的技术方案及其发明构思加以等同替换或改变,都属于本发明的保护范围。



图 1

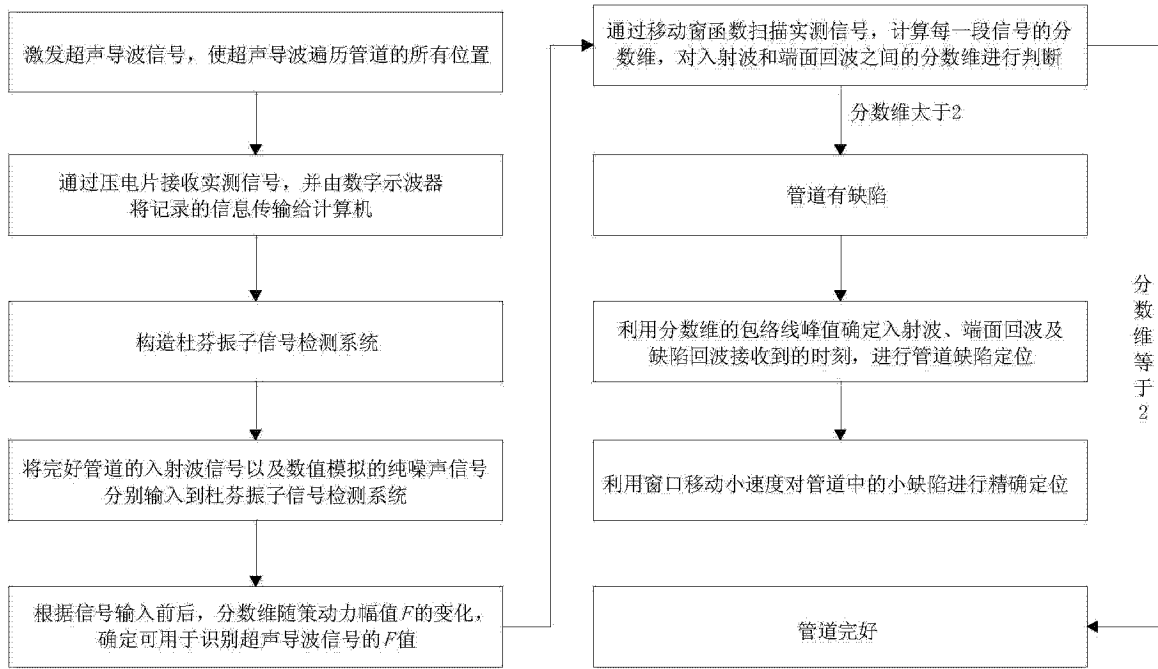


图 2

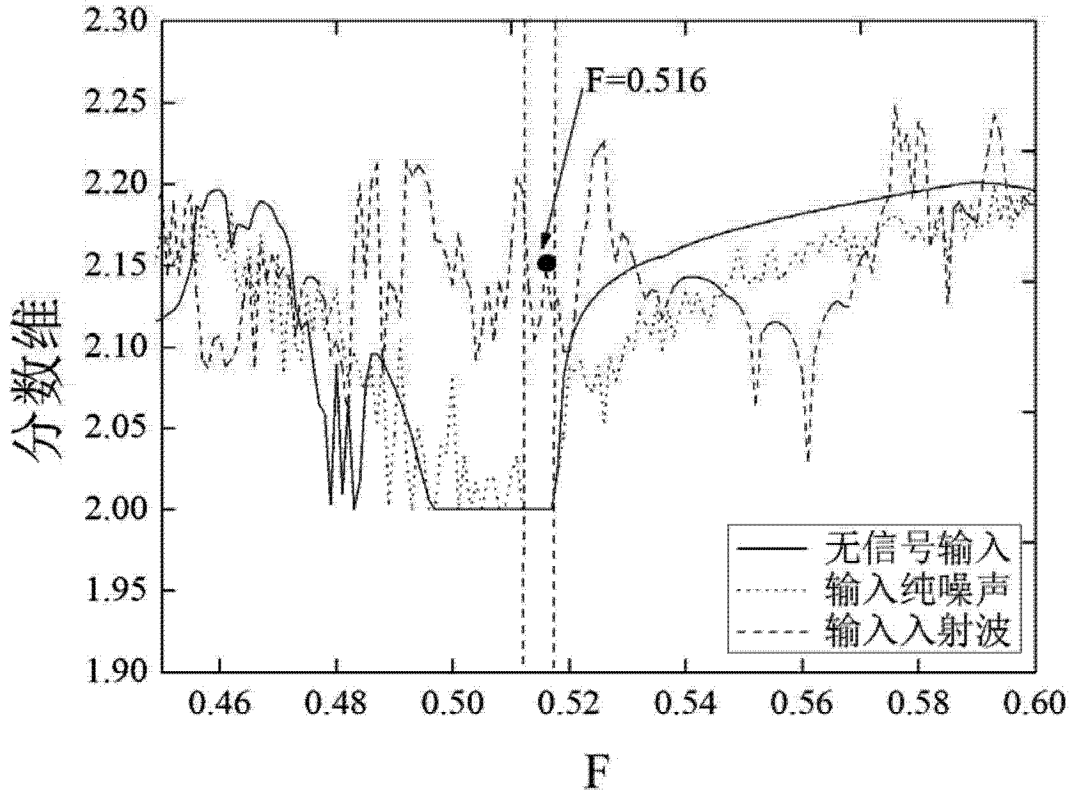


图 3

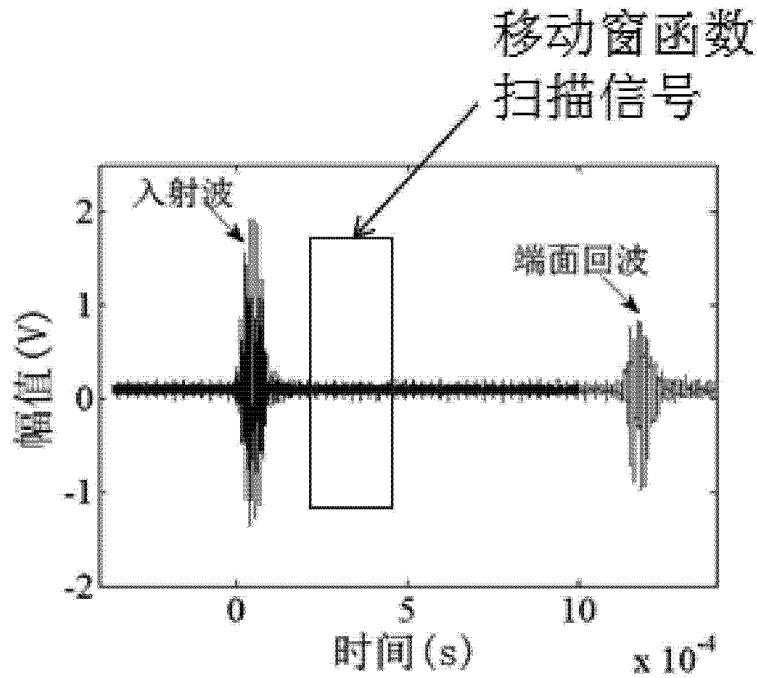


图 4

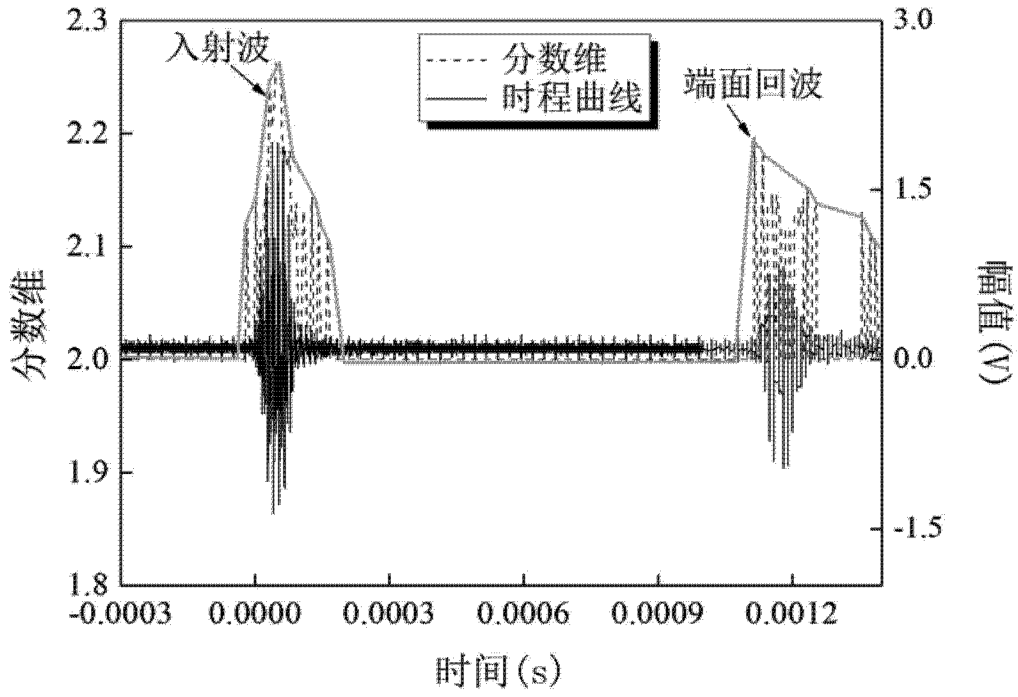


图 5a

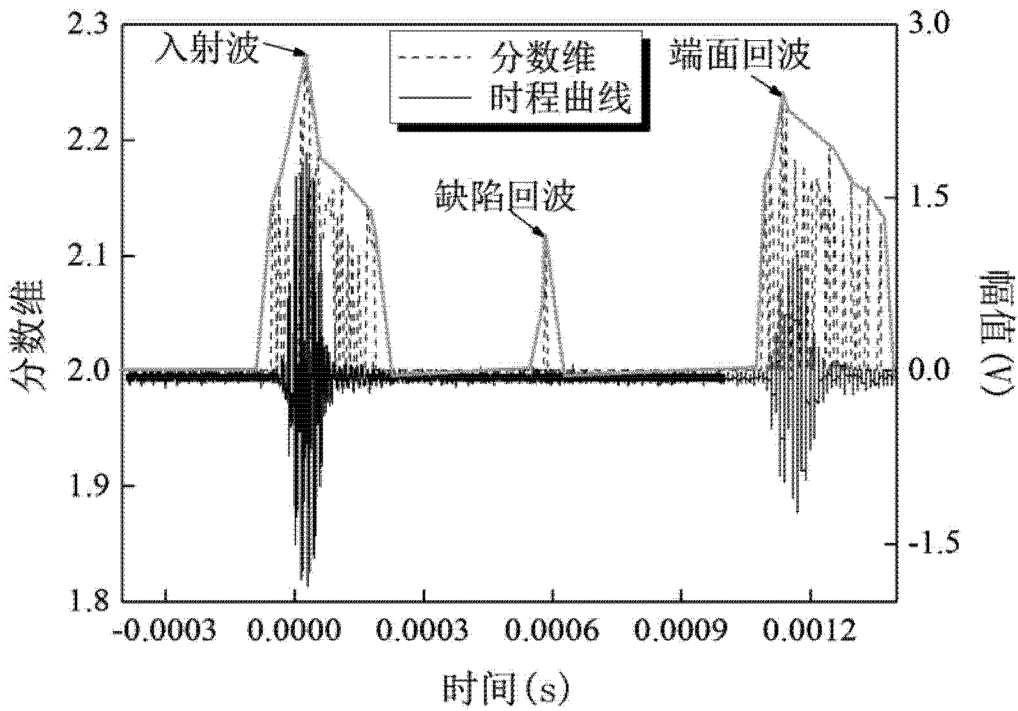


图 5b



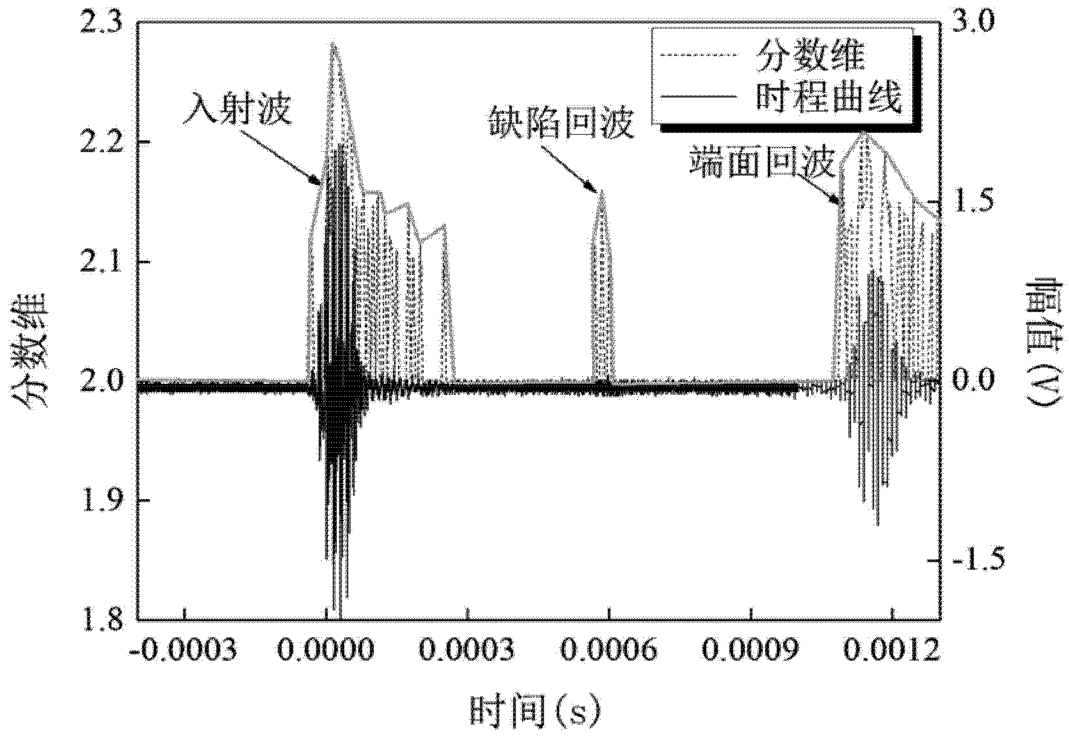


图 5c

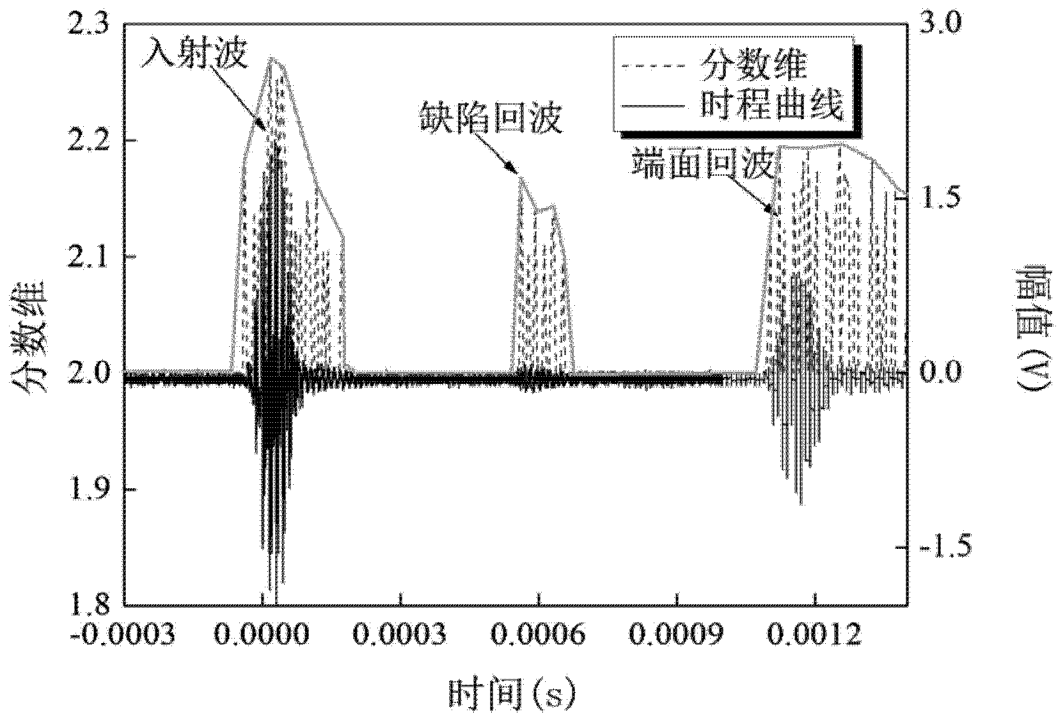


图 5d

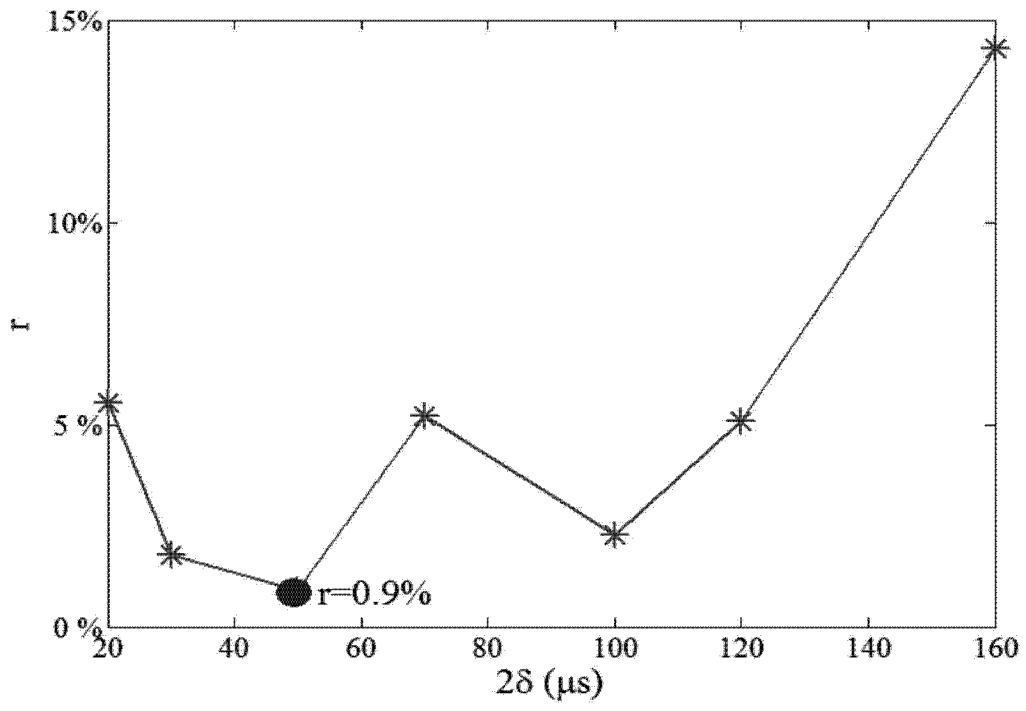


图 6

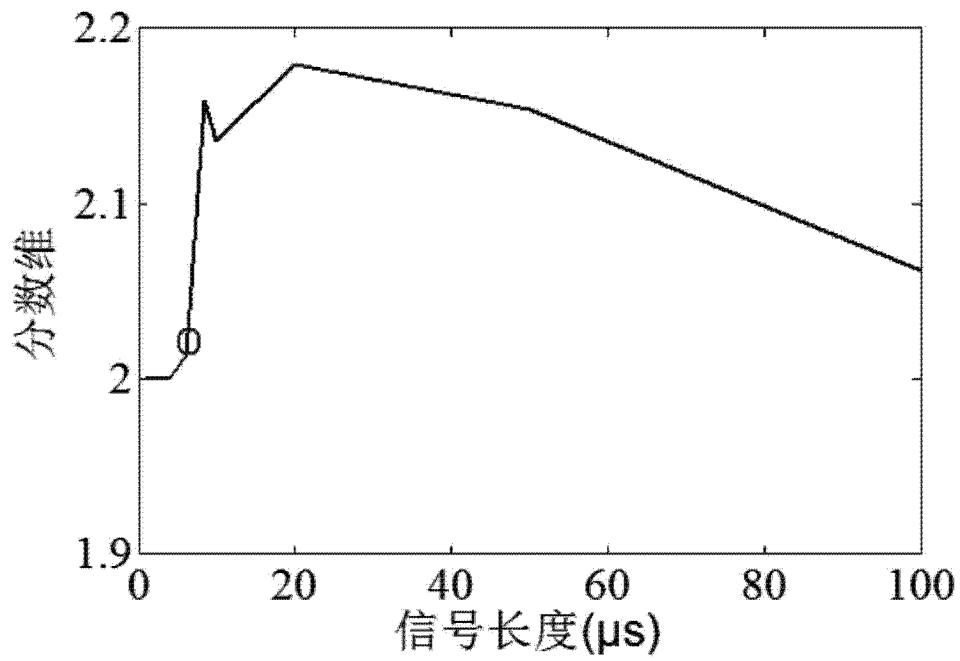


图 7

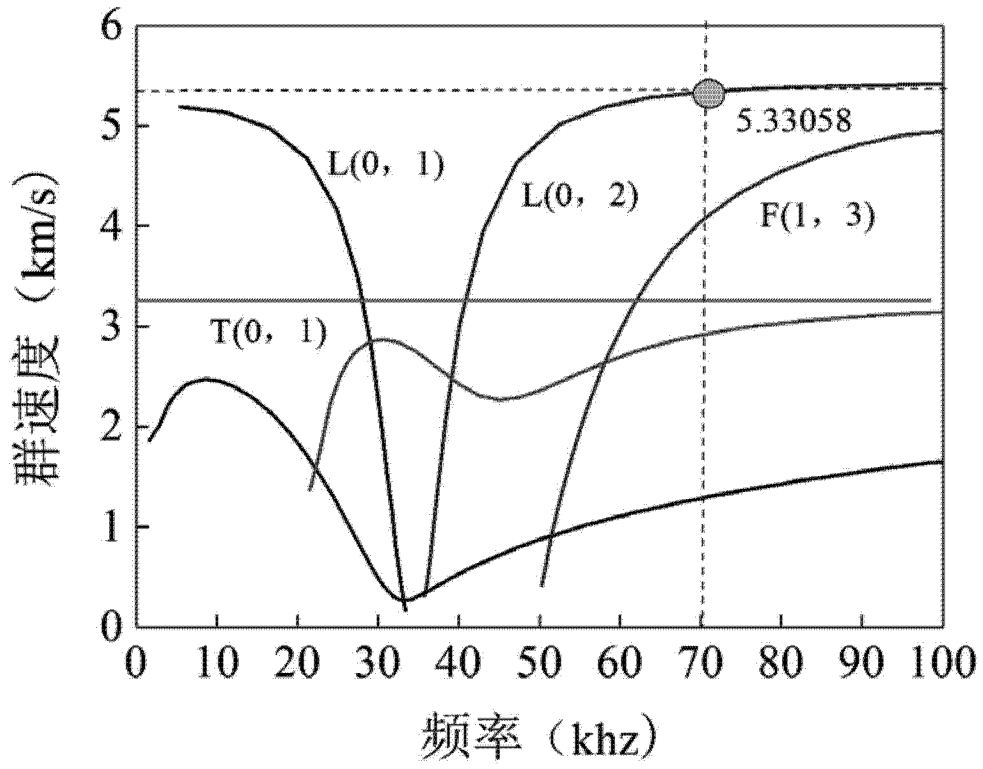


图 8

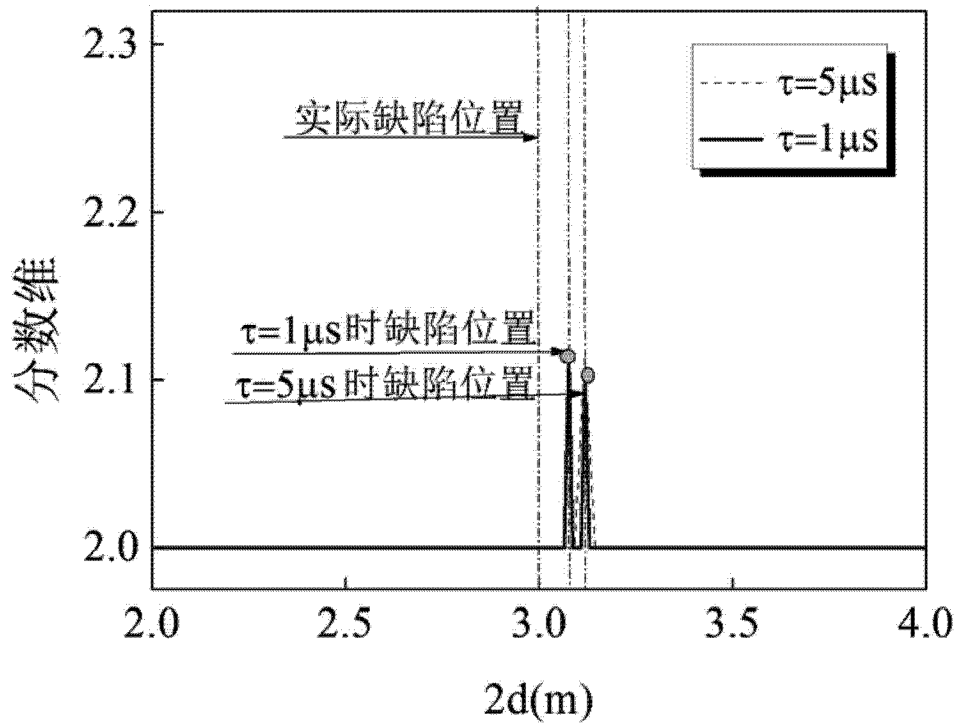


图 9a

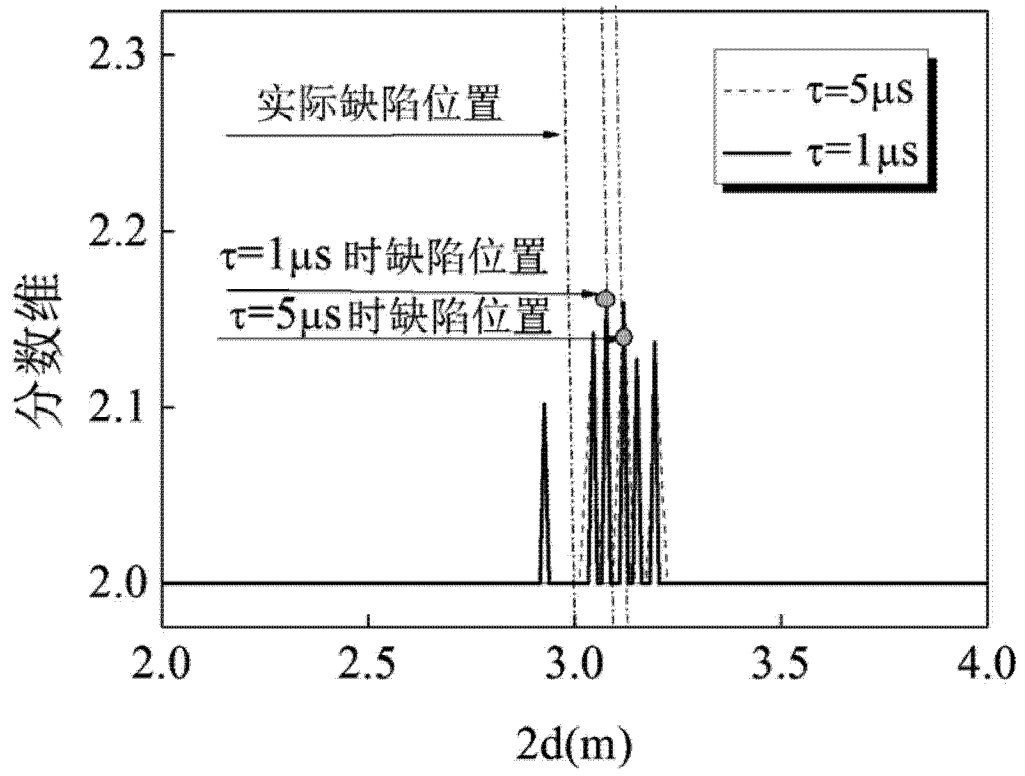


图 9b