



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104747912 B

(45)授权公告日 2017.04.12

(21)申请号 201510196460.0

审查员 尤亚娟

(22)申请日 2015.04.23

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104747912 A

(43)申请公布日 2015.07.01

(73)专利权人 重庆邮电大学

地址 400065 重庆市南岸区黄桷垭崇文路2号

(72)发明人 李帅永 王平

(74)专利代理机构 北京同恒源知识产权代理有限公司 11275

代理人 廖曦

(51)Int.Cl.

F17D 5/06(2006.01)

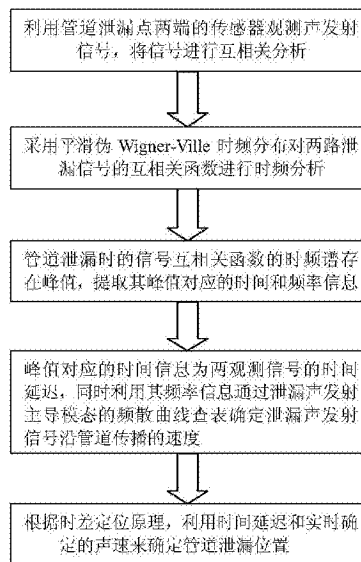
权利要求书1页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

流体输送管道泄漏声发射时频定位方法

(57)摘要

本发明涉及一种流体输送管道泄漏声发射时频定位方法,包括以下步骤:利用安装在管道泄漏点两端的声/振动传感器拾取声发射信号,将拾取的声发射信号进行互相关分析;采用平滑伪Wigner-Ville时频分布对两路声发射信号的互相关函数进行时频分析;提取管道泄漏时的声发射信号的互相关函数的时频谱峰值对应的时间和频率信息;峰值对应的时间信息为两观测信号的时间延迟,利用其频率信息通过频散曲线查表确定泄漏声发射信号沿管道传播的速度;利用时间延迟和实时确定的声速来确定管道泄漏位置。该方法可以用于流体输送管道在泄漏声发射频散严重而声速难以确定的情况下对泄漏点进行准确定位,同时该方法提取单一频率泄漏信号的相关函数进行时延估计,增强了泄漏信号的相关程度,进一步减少泄漏定位误差。



1. 一种流体输送管道泄漏声发射时频定位方法,其特征在於:包括以下步骤:

步骤一:利用管道泄漏点两端的传感器观测声发射信号,将信号进行互相关分析;

步骤二:采用平滑伪Wigner-Ville时频分布对两路泄漏信号的互相关函数进行时频分析;

步骤三:管道泄漏时的信号互相关函数的时频谱存在峰值,提取其峰值对应的时间和频率信息;

步骤四:峰值对应的时间信息为两观测信号的时间延迟,同时利用其频率信息通过泄漏声发射主导模态的频散曲线查表确定泄漏声发射信号沿管道传播的速度;

步骤五:根据时差定位原理,利用时间延迟和实时确定的声速来确定管道泄漏位置。

2. 根据权利要求1所述的一种流体输送管道泄漏声发射时频定位方法,其特征在於:在步骤一中,泄漏点两端传感器拾取的泄漏信号为 $x_1(t)$, $x_2(t)$,则两拾取信号的互相关函数为:

$$R(\tau) = \int x_1\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x_2^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) dt$$

其中, τ 表示两泄漏信号之间的时间延迟;

采用平滑伪Wigner-Ville时频分布来分析时变互相关函数的时间延迟与频率之间的关系,即:

$$C_{x_1 x_2}(\tau, \omega) = SPW(R(\tau))$$

其中, $C_{x_1 x_2}(\tau, \omega)$ 表示两泄漏信号互相关函数的时频分布,平滑伪Wigner-Ville时频分布为:

$$C_{x_1 x_2}(t, \omega) = \int h(\tau) \left(\int g(u-t) R\left(u + \frac{\tau}{2}\right) R^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) du \right) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

其中, $h(\tau)$ 为频域平滑函数, $g(t)$ 为时域平滑函数;

泄漏信号的互相关函数的时频分布 $C_{x_1 x_2}(\tau, \omega)$ 的峰值对应的时间即为两泄漏信号之间的时间延迟,峰值对应的频率为与时间延迟对应的两泄漏信号相干性最强的频率,即:

$$[\omega_0, \hat{D}] = \arg \max C_{x_1 x_2}(\tau, \omega)$$

其中, ω_0 和 \hat{D} 分别表示时频分布的峰值对应的峰值频率和两泄漏信号的时间延迟;

从而,泄漏点的位置可确定为:

$$\hat{d}_1 = \frac{d + c(\omega_0)\hat{D}}{2}$$

其中, \hat{d}_1 表示估计的泄漏点到其中一个传感器的距离, d 表示两传感器之间的距离,为已知或通过现场测量获得; $c(\omega_0)$ 表示频率为 ω_0 时的泄漏声发射信号在流体管道中的声速,泄漏信号的声速随着频率的变化关系可以通过流体管道中主导模态导波的频散曲线获得。

流体输送管道泄漏声发射时频定位方法

技术领域

[0001] 本发明属于管道泄漏检测技术领域,涉及一种流体输送管道泄漏声发射时频定位方法。

背景技术

[0002] 管道作为一种高效便捷的流体输送方式已在石油、天然气等流体输运中广泛采用。由于自然或人为原因:管道老化、腐蚀,地质沉降,不规范施工等,管道泄漏时有发生。管道泄漏会引起资源浪费、环境污染,甚至爆炸、中毒等恶性事故,给人们的生命财产造成严重的威胁。管道泄漏检测定位技术对于减小管道泄漏造成的危害是十分必要的。

[0003] 目前国内外采用的管道泄漏检测方法主要有流量平衡法、瞬时状态估计法、分布式光纤法、压力梯度法、负压力波法、音波检漏法、统计决策法等。中国专利(CN103234121A)对以上管道检漏方法进行了分析对比发现音波检测法具有灵敏度高、定位精度高、误报率低、检测时间短、适应性强等优点,同时构建了一种基于音波信号的管道泄漏检测装置和检测方法,提取泄漏音波的特征量,尽可能排除背景噪声及站内正常操作产生的干扰信号,降低了误报率。该方法通过置于管内的音波传感器可以检测到泄漏瞬间产生的音波信号。当管内流体逐渐趋于平稳时,检测的泄漏音波信号幅度也减少而趋于平稳。音波检测法可以较准确的判断和定位泄漏。但由于瞬间音波出现时间短,要求有较高采样率的检测设备捕捉信号;传感器安装要求对原有管道进行破坏性打孔,打孔安装不当将导致安装孔处流体泄漏,存在一定的安全隐患,同时传感器与管内流体直接接触,要求传感器耐高压耐腐蚀。

[0004] 声发射技术作为一种实时在役的无损检测方法在流体输送管道泄漏检测中日益受到人们的关注。声发射管道泄漏检测仅需要在管壁有限接触点获取泄漏引起的连续声发射信号来便可实现对整个长距离管道的有效检测。中国专利(CN103062628A)公开了一种基于声发射技术的埋地管道泄漏检测定位方法,克服现有泄漏检测技术的不足,结合小波变换消噪和相关分析,实现了对埋地管道实时在役无损检测。该方法应用于长度为6米的试验管道,利用声发射传感器在泄漏点两端管壁上同时获取两路声发射信号,利用互相关对两路声发射信号进行延时估计来确定泄漏位置,定位误差为15.2%。采用小波变换消噪可以在检测管道长度较小时降低互相关定位误差,但定位误差仍在5%以上。这主要是因为互相关定位方法要求泄漏声发射信号沿管道以恒定不变的声速传输,但实际上管道泄漏声发射信号具有宽频带、频散及多模态等特性,不同的模态具有不同程度的频散和不同的传输速度,即泄漏声发射信号在管道中的传播速度与频率和模态类型密切相关,恒定不变的声速难以确定。如果直接对采集的声发射信号进行相关分析并定位泄漏,信号的相关性弱,时延估计误差大;另一方面声速只能取频率范围内某一模态导波速度的平均值,这两点会造成较大泄漏定位误差。因此基于互相关的声发射管道泄漏检测方法定位误差大,不适合用于频散严重而恒定声速难以确定的情况。

发明内容

[0005] 有鉴于此,本发明的目的在于提供一种流体输送管道泄漏声发射时频定位方法,该方法可以用于天然气,供水及其他流体混合物输送管道在泄漏声发射信号频散严重而声速难以确定的情况下对泄漏点进行准确定位。

[0006] 为达到上述目的,本发明提供如下技术方案:

[0007] 一种流体输送管道泄漏声发射时频定位方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤一:利用管道泄漏点两端的声/振动传感器拾取声发射信号,将信号进行互相关分析;

[0009] 步骤二:采用平滑伪Wigner-Ville时频分布对两路泄漏信号的互相关函数进行时频分析;

[0010] 步骤三:管道泄漏时的信号互相关函数的时频谱存在峰值,提取其峰值对应的时间和频率信息;

[0011] 步骤四:峰值对应的时间信息为两观测信号的时间延迟,同时利用其频率信息通过泄漏声发射主导模态的频散曲线查表确定泄漏声发射信号沿管道传播的速度;

[0012] 步骤五:根据时差定位原理,利用时间延迟和实时确定的声速来确定管道泄漏位置。

[0013] 进一步,在步骤一中,泄漏点两端传感器拾取的泄漏信号为 $x_1(t)$, $x_2(t)$,则两拾取信号的互相关函数为:

$$[0014] \quad R(\tau) = \int x_1\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x_2^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) dt$$

[0015] 其中, τ 表示两泄漏信号之间的时间延迟;

[0016] 采用平滑伪Wigner-Ville时频分布来分析时变互相关函数的时间延迟与频率之间的关系,即:

$$[0017] \quad C_{x_1x_2}(\tau, \omega) = SPW(R(\tau))$$

[0018] 其中, $C_{x_1x_2}(\tau, \omega)$ 表示两泄漏信号互相关函数的时频分布,平滑伪Wigner-Ville时频分布为:

$$[0019] \quad SPW(t, \omega) = \int h(\tau) \left(\int g(u-t) x\left(u + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) du \right) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

[0020] 其中, $h(t)$ 为频域平滑函数, $g(t)$ 为时域平滑函数;

[0021] 泄漏信号的互相关函数的时频分布 $C_{x_1x_2}(\tau, \omega)$ 的峰值对应的时间即为两泄漏信号之间的时间延迟,峰值对应的频率为与时间延迟对应的两泄漏信号相干性最强的频率,即:

$$[0022] \quad [\omega_0, \hat{D}] = \arg \max C_{x_1x_2}(\tau, \omega)$$

[0023] 其中, ω_0 和 \hat{D} 分别表示时频分布的峰值对应的峰值频率和两泄漏信号的时间延迟;

[0024] 从而,泄漏点的位置可确定为:

$$[0025] \quad \hat{d}_1 = \frac{d + c(\omega_0)\hat{D}}{2}$$

[0026] 其中, \hat{d}_1 表示估计的泄漏点到其中一个传感器的距离, d 表示两传感器之间的距离, 为已知或通过现场测量获得; $c(\omega_0)$ 表示频率为 ω_0 时的泄漏声发射信号在流体管道中的声速, 泄漏信号的声速随着频率的变化关系可以通过流体管道中主导模态导波的频散曲线获得。

[0027] 本发明的有益效果在于: 本发明所述方法同时提取泄漏声发射信号的时间和频率信息, 利用频率信息通过查表在线确定声速来解决因泄漏信号的频散特性导致声速难以准确确定的问题; 同时, 提取单一频率的互相关增强了泄漏声发射信号的相关程度从而提高时延估计的精度; 因此, 本方法可以有效解决因频散特性导致的管道泄漏定位误差大的问题。

附图说明

[0028] 为了使本发明的目的、技术方案和有益效果更加清楚, 本发明提供如下附图进行说明:

[0029] 图1为管道泄漏声发射检测定位示意图;

[0030] 图2为泄漏声发射信号在管道中传输的群速度频散曲线;

[0031] 图3中 (a) 为泄漏声发射信号的互相关函数的时频谱, (b) 为时频谱峰值频率对应的互相关系数;

[0032] 图4为泄漏声发射信号的互相关时延估计;

[0033] 图5为泄漏声发射时频定位误差分布;

[0034] 图6为本发明所述方法的流程示意图。

具体实施方式

[0035] 下面将结合附图, 对本发明的优选实施例进行详细的描述。

[0036] 图6为本发明所述方法的流程示意图, 如图所示, 本发明所述的定位方法包括以下步骤: 步骤一: 利用管道泄漏点两端的传感器观测声发射信号, 将信号进行互相关分析; 步骤二: 采用平滑伪Wigner-Ville时频分布对两路泄漏信号的互相关函数进行时频分析; 步骤三: 管道泄漏时的信号互相关函数的时频谱存在峰值, 提取其峰值对应的时间和频率信息; 步骤四: 峰值对应的时间信息为两观测信号的时间延迟, 同时利用其频率信息通过泄漏声发射主导模态的频散曲线查表确定泄漏声发射信号沿管道传播的速度; 步骤五: 根据时差定位原理, 利用时间延迟和实时确定的声速来确定管道泄漏位置。

[0037] 具体来说:

[0038] 图1为管道泄漏声发射检测定位示意图, 由于流体管道泄漏引起的声发射信号为连续信号, 与瞬态信号不同, 连续的泄漏声发射信号无法直接从时域波形中反映其在流体管道中传输一段距离后的时间延迟。通常, 在流体管道泄漏点两端管壁安装声/振动传感器来拾取泄漏引起的声发射信号, 然后对两拾取泄漏声发射信号进行相关处理, 采集的泄漏声发射信号的互相关函数能够反映出泄漏源信号从泄漏点传输到两接收传感器处的时间延迟。设泄漏点两端加速度传感器拾取的泄漏信号为 $x_1(t)$, $x_2(t)$, 则两拾取信号的互相关函数为

$$[0039] \quad R(\tau) = \int x_1\left(t + \frac{\tau}{2}\right)x_2^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)dt \quad (1)$$

[0040] 其中, τ 表示两泄漏信号之间的时间延迟。

[0041] 泄漏声发射信号在流体管道中传输时具有频散特性,即泄漏声发射信号在流体管道中的传输速度随着信号频率的变化而变化,从而导致泄漏信号在流体管道中传输时产生的时间延迟也是随着信号频率的变化而变化,即不同频率成分的泄漏声发射信号具有不同的时间延迟。于是,对于频散信号的互相关函数 $R(\tau)$ 来说,其频率成分随着时间延迟 τ 变化的,互相关函数 $R(\tau)$ 是关于时间延迟 τ 的信号,则频散信号的互相关函数仍然是频散信号,并且是关于时间延迟的频散信号。实际上,这正是时变信号的本质属性决定的,即时变信号的互相关函数也是时变函数。

[0042] 为了揭示时变的互相关函数的时间延迟与频率之间的关系,采用时频分析理论对时变的互相关函数进行时频分析。由时频分析理论研究表明,采用平滑的伪Wigner-Ville时频分布即能得到较高的时频分辨率,又能较好地抑制交叉项的干扰。于是,在本方法中采用平滑伪Wigner-Ville时频分布来分析时变互相关函数的时间延迟与频率之间的关系,即

$$[0043] \quad C_{x_1x_2}(\tau, \omega) = SPW(R(\tau)) \quad (2)$$

[0044] 其中, $C_{x_1x_2}(\tau, \omega)$ 表示两泄漏信号互相关函数的时频分布,平滑伪Wigner-Ville时频分布为

$$[0045] \quad SPW(t, \omega) = \int h(\tau) \left(\int g(u-t)x\left(u + \frac{\tau}{2}\right)x^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right)du \right) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3)$$

[0046] 其中, $h(t)$ 为频域平滑函数, $g(t)$ 为时域平滑函数。

[0047] 显然,泄漏信号的互相关函数的时频分布 $C_{x_1x_2}(\tau, \omega)$ 的峰值对应的时间即为两泄漏信号之间的时间延迟,峰值对应的频率为与时间延迟对应的两泄漏信号相干性最强的频率。即

$$[0048] \quad [\omega_0, \hat{D}] = \arg \max C_{x_1x_2}(\tau, \omega) \quad (4)$$

[0049] 其中, ω_0 和 \hat{D} 分别表示时频分布的峰值对应的峰值频率和两泄漏信号的时间延迟。于是根据基于时延估计的声发射管道泄漏定位原理如图1所示,泄漏点的位置可确定为

$$[0050] \quad \hat{d}_1 = \frac{d + c(\omega_0)\hat{D}}{2} \quad (5)$$

[0051] 其中, \hat{d}_1 表示采用时频定位原理估计的泄漏点到传感器1的距离, d 表示两传感器之间的距离,通常为已知或通过现场测量获得。 $c(\omega_0)$ 表示频率为 ω_0 时的泄漏声发射信号在流体管道中的声速,泄漏信号的声速随着频率的变化关系可以通过流体管道中主导模态导波的频散曲线获得。

[0052] 管道泄漏属于非均匀载荷问题,其泄漏声发射的主导模态为弯曲模态,其频散曲线主要由管道材质、半径、厚度等因素决定,可以由频散方程确定。本发明方法利用对频散方程进行数值分析,求出不同频率情况下对应的泄漏声发射的传播速度,利用互相关函数的时频谱确定的峰值频率即可查表确定泄漏声发射的传播速度。

[0053] 实施例：

[0054] 将本发明提出的管道泄漏声发射时频定位方法应用到气体管道泄漏检测实验平台中,其中管道总长为110m,气压在0.2MPa以内,管道的几何和材料参数如表1所示:

[0055] 表1实验用管道几何与材料参数

[0056]	a (mm)	b (mm)	μ	c_0 (m/s)	ρ (kg/m ³)	G (GPa)	E (GPa)
	12.7	16.2	0.3	4997	7850	79	196

[0057] 表中, a 、 b 分别为管道的内径和外径; μ 、 ρ 分别为管壁材料的泊松比和密度; G 、 E 分别为管壁材料的剪切模量和杨氏模量; c_0 是管壁材料对应的杆速, $c_0 = \sqrt{E/\rho}$ 。

[0058] 利用管道的几何结构和材料参数,可以求取管道频散方程的数值解,其群速度频散曲线如图2,然后将群速度与频率的对应结果制成表格以供利用频率通过查表来确定声速。

[0059] 采用MEMS高灵敏加速度传感器(频率范围:0-2.5kHz)获取气体泄漏声发射信号,采样率为5kHz。对相距37.058米的两加速度传感器的观测信号的互相关函数进行时频分析,如图3,图3(a)中互相关函数的时频谱峰值对应的频率为356.45Hz,峰值对应的时间延迟为0.0122s,提取在峰值频率356.45Hz下的互相关系数如图3(b),其相关系数高达0.8469。利用峰值频率356.45Hz在如图2所示的群速度频散曲线中查表确定其对应的声速为667.3m/s。将时间延迟与声速带入时差定位公式可以确定传感器1到泄漏位置的距离 $\hat{l}_1 = 22.5995m$,而实际距离为23.95m,因此定位误差为1.35m,相对定位误差为3.64%。对同一组泄漏声发射信号采用互相关分析,根据气体泄漏声发射信号的频率范围主要集中在1000Hz以内,在对泄漏信号进行互相关之前先对泄漏信号低通滤波以提高其相关程度,其低通滤波器的截止频率设置为1000Hz。低通滤波后的泄漏声发射信号的互相关时延估计为0.0036s如图4,其对应的互相关系数为0.2399,对泄漏信号在频率范围0-1000Hz的群速度进行平均作为互相关定位的声速,其平均速度为745.5m/s,于是将时延估计和平均声速带入时差定位公式可确定传感器1到泄漏点的距离为 $\hat{l}_1 = 19.8709m$ 。与实际泄漏点的位置相比,定位误差为4.079m,相对定位误差11.01%。因此,对比两种定位结果发现,采用本发明提出的管道泄漏声发射时频定位方法,一方面提取峰值频率并通过泄漏声发射主导模式的频散曲线查表准确确定声速;另一方面提取单一频率互相关函数增强了两泄漏信号的互相关程度从而使时间延时估计更加准确,从而明显降低管道泄漏声发射定位误差。为了进一步证实本发明提出的管道泄漏声发射时频定位方法的有效性,对不同泄漏位置进行了重复性检测定位实验共29次,定位结果如表2,对表2中的定位误差进行分析如图5,发现定位误差服从以平均定位误差2.1%为中心的正态分布,其中定位误差在1%以内样本占了总样本容量的一半,而定位误差在5%以上的样本只有一个。

[0060] 表2管道泄漏声发射时频定位结果

[0061]

l (m)	f (Hz)	v (m/s)	l_1 (m)	\hat{D} (s)	\hat{l}_1 (m)	Δl_1 (m)	δl_1 (%)
15.921	961.9	1060.9	4.256	0.0084	3.5047	-0.7513	4.72
15.921	900.9	1029.7	4.256	0.0094	3.1209	-1.1351	7.13
15.921	961.9	1060.9	4.256	0.0084	3.5047	-0.7513	4.72
15.921	959.5	1059.9	4.256	0.0068	4.3568	0.1008	0.63
19.41	366.2	645	12.66	0.0098	12.8655	0.2055	1.1
19.41	363.8	643.3	12.66	0.01	12.9215	0.2615	1.35
19.41	366.2	645	12.66	0.009	12.6075	-0.0525	0.27
19.41	363.8	643.3	12.66	0.0092	12.6642	0.0042	0.02
19.41	366.2	645	12.66	0.0094	12.7365	0.0765	0.39
15.921	959.5	1059.9	11.665	0.0068	11.5642	-0.1008	0.63
15.921	773.9	960.8	11.665	0.0092	12.3802	0.7152	4.49
15.921	773.9	960.8	11.665	0.009	12.2841	0.6191	3.89
15.921	961.9	1060.9	11.665	0.0084	12.4163	0.7513	4.72
19.41	366.2	645	6.75	0.0094	6.6735	-0.0765	0.39
19.41	366.2	645	6.75	0.0098	6.5445	-0.2055	1.06
19.41	361.3	640.7	6.75	0.0082	7.0781	0.3281	1.69
19.41	368.7	647.5	6.75	0.0094	6.6617	-0.0883	0.45
35.615	358.9	669	23.95	0.0124	22.6768	-1.2732	3.44
35.615	358.9	669	23.95	0.012	22.5430	-1.4070	3.8
35.615	424.8	725	23.95	0.0124	23.024	-0.926	2.5

[0062]

35.615	424.8	725	23.95	0.0144	23.749	-0.201	0.54
67.71	988.8	1024.2	54.97	0.0408	54.7487	-0.2213	0.33
67.71	988.8	1024.2	54.97	0.0402	54.4414	-0.5286	0.78
67.71	988.8	1024.2	54.97	0.0362	52.393	-2.577	3.81
67.71	986.3	1023.3	54.97	0.0398	54.2817	-0.7513	1.11
35.615	424.8	725	13.108	0.0144	13.3090	0.201	0.54
35.615	878.9	1018.2	13.108	0.0122	12.318	-0.79	2.13
35.615	886.2	1022.2	13.108	0.0116	12.6002	-0.5078	1.37
35.615	600.6	853.8	13.108	0.01	14.26	1.152	3.11

[0063] 其中： f 是泄漏声发射信号的互相关函数的时频谱峰值频率， $f = \omega_0/2\pi$ ， ω_0 是角频率； \hat{l}_1 是采用时频定位方法检测到的传感器1与泄漏点之间的距离 l_1 （见图1）； Δl_1 是时频定位的绝对定位误差， δl_1 是时频定位的相对定位误差。

[0064] 最后说明的是，以上优选实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制，尽管通过上述优选实施例已经对本发明进行了详细的描述，但本领域技术人员应当理解，可以在形式上和细节上对其做出各种各样的改变，而不偏离本发明权利要求书所限定的范围。

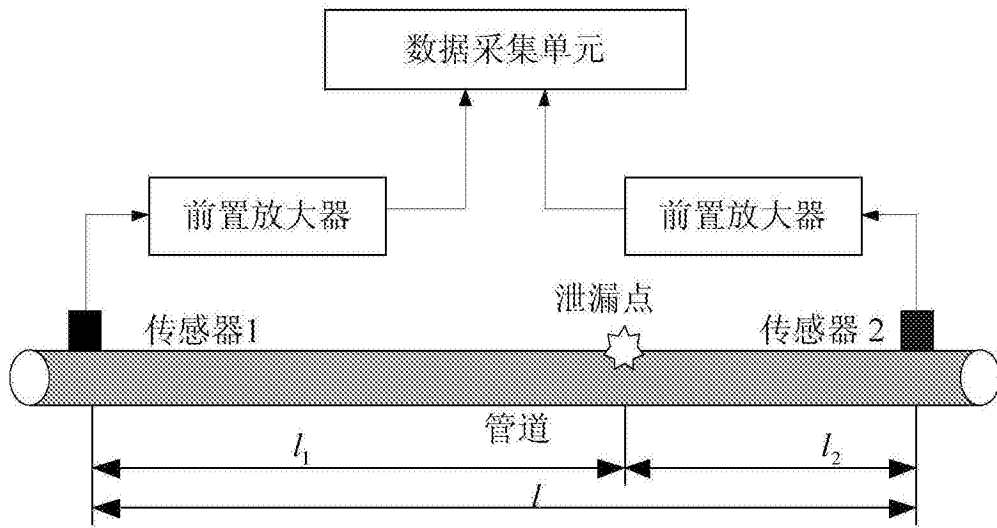


图1

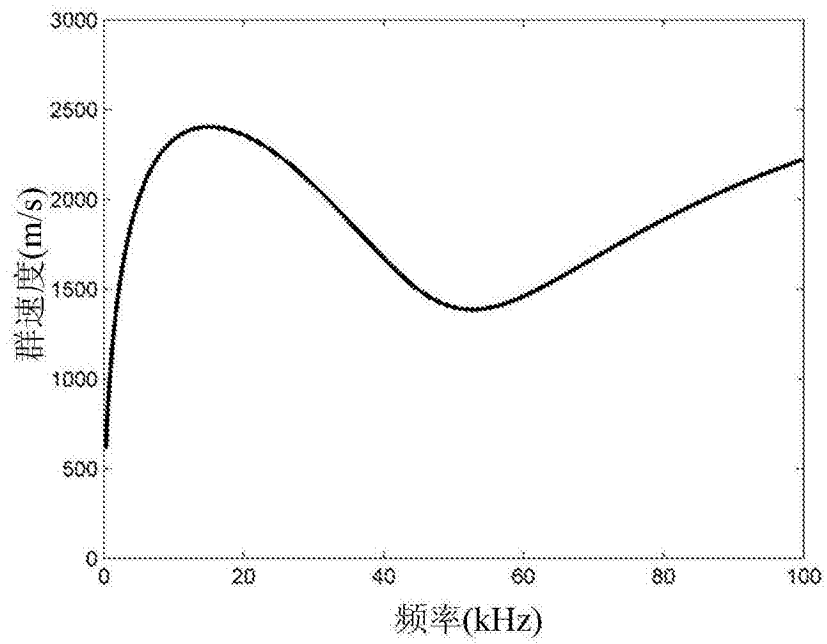


图2

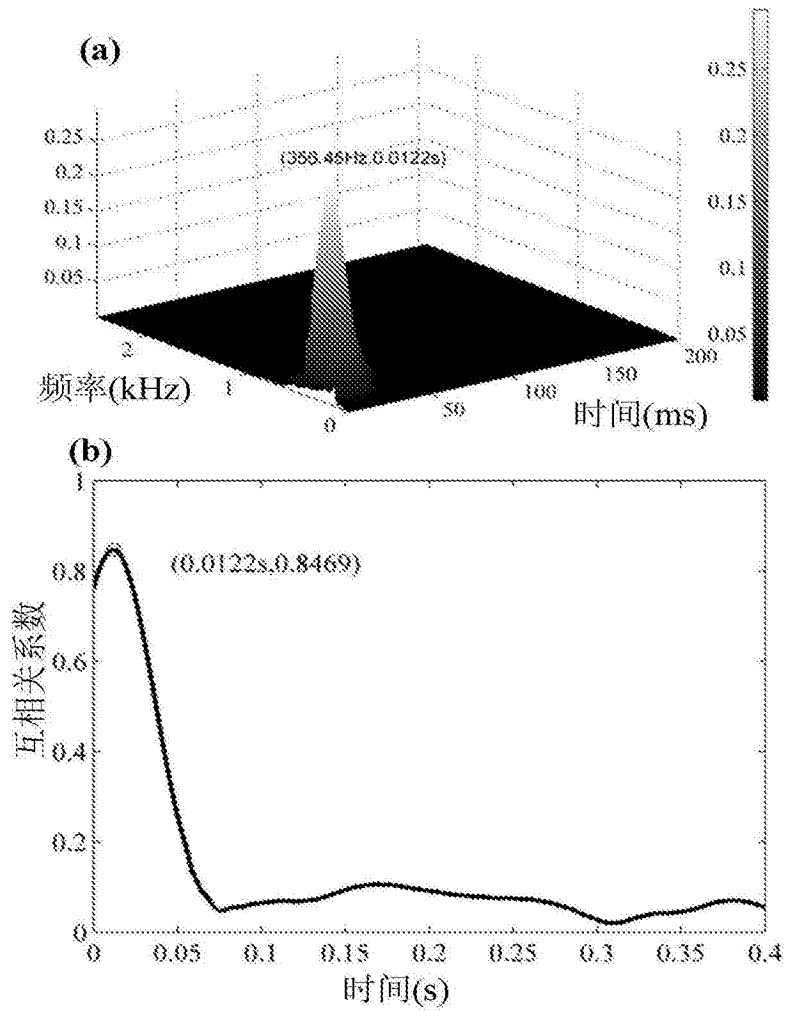


图3

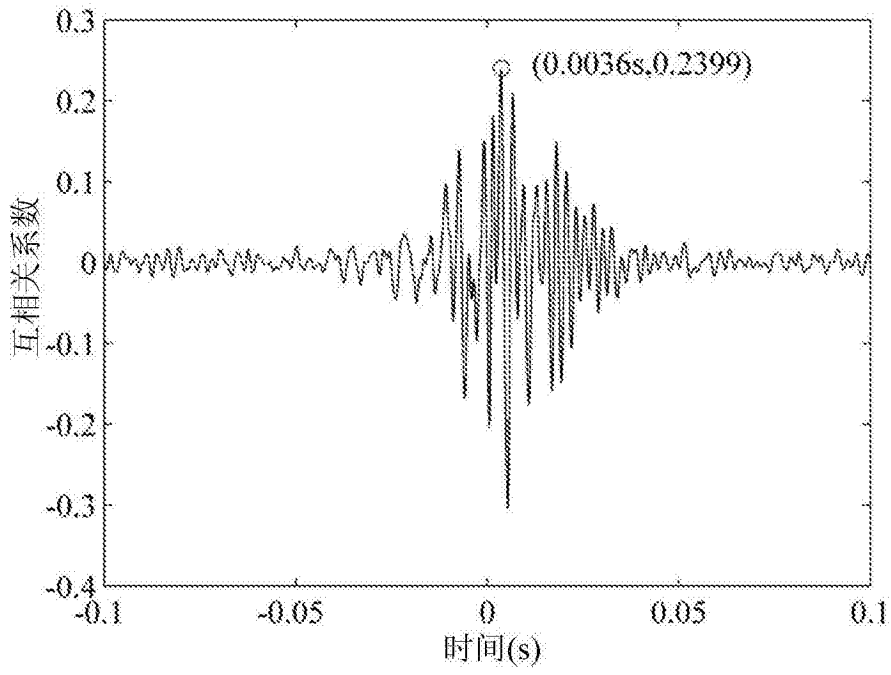


图4

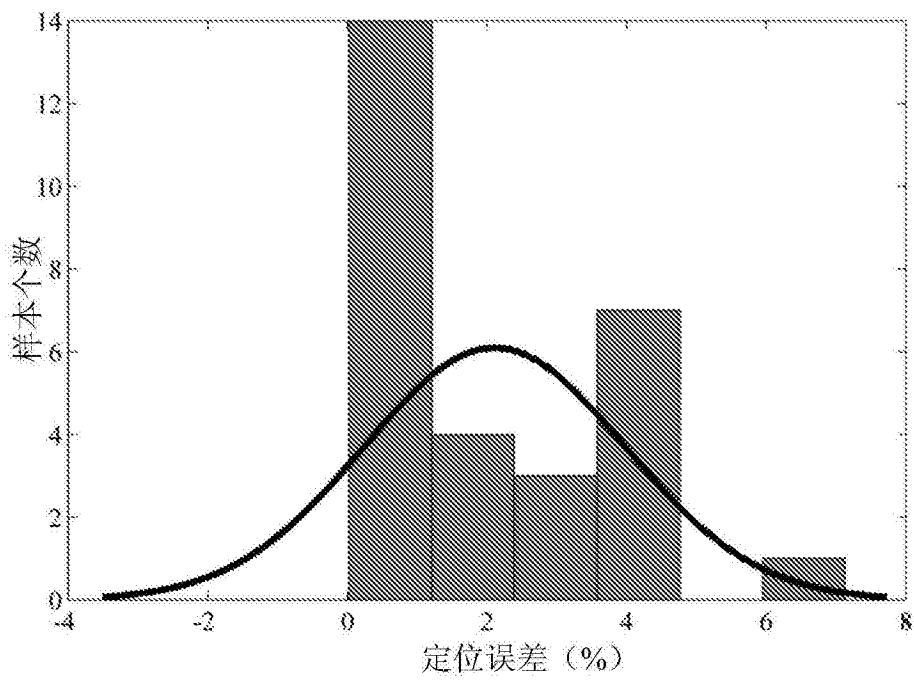


图5

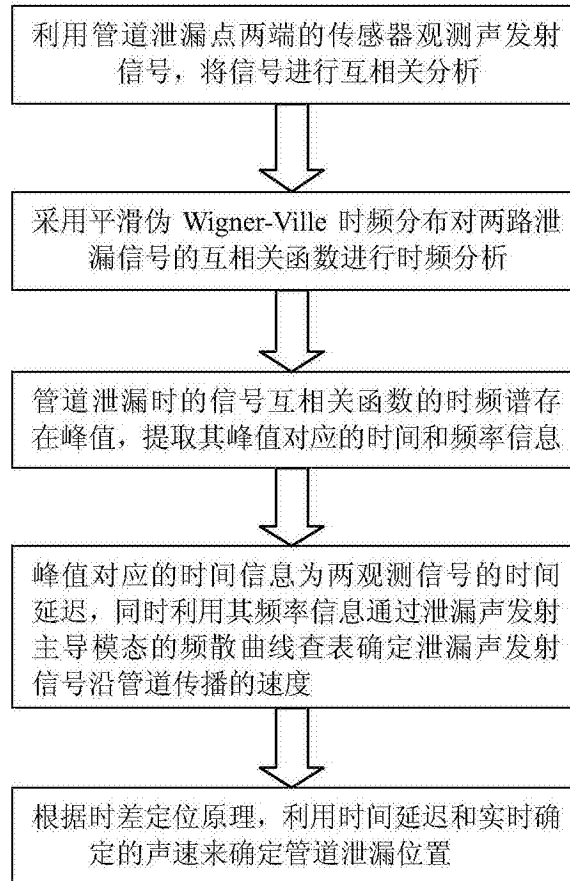


图6