



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110553156 A

(43)申请公布日 2019.12.10

(21)申请号 201910817612.2

(22)申请日 2019.08.30

(71)申请人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区清华园

(72)发明人 黄松岭 王哲 王坤 赵伟

于歆杰 董甲瑞 汪芙平

(74)专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事

务所(普通合伙) 11201

代理人 王艳斌

(51)Int.Cl.

F17D 5/06(2006.01)

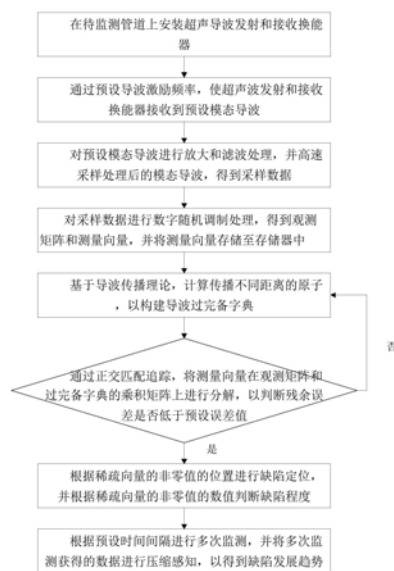
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

管道超声导波压缩感知健康监测方法

(57)摘要

本发明公开了一种管道超声导波压缩感知健康监测方法,包括:在管道上安装超声导波发射和接收换能器,令其发射端激发所需模态导波,接收端接收相应模态导波;对导波离散采样,获得导波监测数据,并对该数据进行数字随机调制,得到观测矩阵和测量向量,将测量向量存储相应存储器中;根据导波传播理论,计算传播不同距离的原子,构建导波过完备字典;使用正交匹配追踪,将测量向量在观测矩阵和过完备字典的乘积矩阵上进行分解,得到稀疏向量;根据稀疏向量的非零值的位置进行缺陷定位,和非零值的数值判断缺陷程度;根据预设时间进行多次监测,将多次监测数据进行压缩感知,得到缺陷的发展趋势。该方法减少了数据存储量,同时保证了缺陷的监测精度。



1. 一种管道超声导波压缩感知健康监测方法,包括以下步骤:

S1,在待监测管道上安装超声导波发射和接收换能器;

S2,通过预设导波激励频率,使所述超声波发射和接收换能器接收到预设模态导波;

S3,对所述预设模态导波进行放大和滤波处理,并高速采样处理后的模态导波,得到采样数据;

S4,对所述采样数据进行数字随机调制处理,得到观测矩阵和测量向量,并将所述测量向量存储至存储器中;

S5,基于导波传播理论,计算传播不同距离的原子,以构建导波过完备字典;

S6,通过正交匹配追踪,将所述测量向量在所述观测矩阵和所述过完备字典的乘积矩阵上进行分解,并判断残余误差是否低于预设误差值;

S7,若所述残余误差低于所述预设误差值,则分解迭代过程结束,得到稀疏向量,执行下一步骤,若所述残余误差不低于所述误差预设值,则执行步骤S6再次分解;

S8,根据所述稀疏向量的非零值的位置进行缺陷定位,并根据所述稀疏向量的非零值的数值判断缺陷程度;

S9,根据预设时间间隔进行多次监测,并将多次监测获得的数据进行压缩感知,以得到缺陷发展趋势。

2. 根据权利要求1所述的管道超声导波压缩感知健康监测方法,其特征在于,所述超声导波发射和接收换能器采用电磁超声换能器,所述电磁超声换能器由线圈和镍带构成,通过环氧树脂胶将所述镍带粘贴在所述待检测管道外壁,所述线圈置于所述镍带外表面,所述镍带经过永磁体磁化获取周向的磁场。

3. 根据权利要求1所述的管道超声导波压缩感知健康监测方法,其特征在于,所述数字随机调制包括调制和数字低通滤波器构成,其中,所述数字随机调制处理过程为:

$$y(n) = \Phi x(n)$$

式中, $x(n)$ 为采样数据, Φ 为观测向量, $y(n)$ 为经过随机调制后获得的测量数据,其数据长度低于采样数据。

4. 根据权利要求1所述的管道超声导波压缩感知健康监测方法,其特征在于,所述原子的表达式为:

$$d_j = u(r_j, t) \quad d_j \in D$$

式中, D 为原子, $D = [d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_M]$, $j = 1, 2, \dots, M$, M 为正整数, r_j 为导波往返传播距离, t 为时间, u 为导波在管道任意点任意时间的位移。

5. 根据权利要求4所述的管道超声导波压缩感知健康监测方法,其特征在于,其中,

$$u(r_j, t) = C_j \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i(k(\omega)r_j - \omega t)} d\omega$$

式中, r_j 为导波往返传播距离, t 为时间, ω 是角频率, $F(\omega)$ 是激励波形的傅里叶变换, $k(\omega)$ 是波数, C_j 是衰减系数, i 为时间。

6. 根据权利要求1所述的管道超声导波压缩感知健康监测方法,其特征在于,求解所述稀疏向量的目标方程为:

$$\min \|a\|_0 \text{ s.t. } \|\Phi Da - y\|_2 \leq \varepsilon$$

式中, a 为稀疏向量, ε 为预设误差值, \min 为最小值, y 为测量数据, D 为原子。

7. 根据权利要求1所述的管道超声导波压缩感知健康监测方法,其特征在于,所述稀疏向量的非零值的位置对应于所述过完备字典中的列数,包含缺陷位置信息,以对缺陷进行定位。

8. 根据权利要求1所述的管道超声导波压缩感知健康监测方法,其特征在于,所述稀疏向量的非零值的数值反映导波波形的幅度,以判断缺陷的严重程度,数值大小与缺陷严重程度成正比。

管道超声导波压缩感知健康监测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及无损检测技术领域,特别涉及一种管道超声导波压缩感知健康监测方法。

背景技术

[0002] 输送石油和天然气的管道在使用过程中面临腐蚀和应力问题,因此,缺陷不可避免地发生,并且会缩短管道的使用寿命。当缺陷带来油气泄漏时,可能会引发爆炸等安全事故,对财产和人身安全带来威胁,因此,需要对管道结构进行定期的监测,以掌握其健康状况。超声波导波为管道健康监测提供了一种有效的方法,使用原位传感器的监测方案可以长期对管道进行监测,从而有助于诊断缺陷严重程度并预测健康状况。导波可以沿管道长距离传播,且导波覆盖整个管道壁厚范围,这使得导波能够同时检测管道表面和内部缺陷。导波是一种机械波,它会与缺陷相互作用从而产生反射回波。通过分析接收的回波信号,可以提取缺陷信息。

[0003] 然而,长期的管道监测会带来大量的数据,这些数据的存储需要耗费非常多的存储器,而常规的数据压缩方法可能带来信息丢失,成为制约管道健康监测的一个重要问题。目前,缺少适合的用于管道健康监测的超声导波数据压缩恢复方法。因此,需要开发有效的数据压缩方案,保留导波数据的全部信息,同时研究可靠的导波数据恢复方案,从压缩数据中恢复监测信息,得到管道中缺陷的位置和严重程度。

发明内容

[0004] 本发明旨在至少在一定程度上解决相关技术中的技术问题之一。

[0005] 为此,本发明的目的在于提出一种管道超声导波压缩感知健康监测方法,该方法大大减小了数据存储量,同时保证缺陷的监测精度。

[0006] 为达到上述目的,本发明提出了管道超声导波压缩感知健康监测方法,包括以下步骤:S1,在待检测管道上安装超声导波发射和接收换能器;S2,通过预设导波激励频率,使所述超声波发射和接收换能器接收到预设模态导波;S3,对所述预设模态导波进行放大和滤波处理,并高速采样处理后的模态导波,得到采样数据;S4,对所述采样数据进行数字随机调制处理,得到观测矩阵和测量向量,并将所述测量向量存储至存储器中;S5,基于导波传播理论,计算传播不同距离的原子,以构建导波过完备字典;S6,通过正交匹配追踪,将所述测量向量在所述观测矩阵和所述过完备字典的乘积矩阵上进行分解,并判断残余误差是否低于预设误差值;S7,若所述残余误差低于所述预设误差值,则分解迭代过程结束,得到稀疏向量,执行下一步骤,若所述残余误差不低于所述误差预设值,则执行步骤S6再次分解;S8,根据所述稀疏向量的非零值的位置进行缺陷定位,并根据所述稀疏向量的非零值的数值判断缺陷程度;S9,根据预设时间间隔进行多次监测,并将多次监测获得的数据进行压缩感知,以得到缺陷发展趋势。

[0007] 本发明实施例的管道超声导波压缩感知健康监测方法,通过存储压缩后的导波数

据,从而大大减小了数据存储量,同时保证缺陷的监测精度,具有广阔的实际应用前景。

[0008] 另外,根据本发明上述实施例的管道超声导波压缩感知健康监测方法还可以具有以下附加的技术特征:

[0009] 在本发明的一个实施例中,所述超声导波发射和接收换能器采用电磁超声换能器,所述电磁超声换能器由线圈和镍带构成,通过环氧树脂胶将所述镍带粘贴在所述待检测管道外壁,所述线圈置于所述镍带外表面,所述镍带经过永磁体磁化获取周向的磁场。

[0010] 在本发明的一个实施例中,所述数字随机调制包括调制和数字低通滤波器构成,其中,所述数字随机调制处理过程为:

$$[0011] \quad y(n) = \Phi x(n)$$

[0012] 式中, $x(n)$ 为采样数据, Φ 为观测向量, $y(n)$ 为经过随机调制后获得的测量数据,其数据长度远远低于采样数据。

[0013] 在本发明的一个实施例中,所述原子的表达式为:

$$[0014] \quad d_j = u(r_j, t) \quad d_j \in D$$

[0015] 式中, D 为原子, $D = [d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_M]$, $j = 1, 2, \dots, M$, M 为正整数, r_j 为导波往返传播距离, t 为时间, u 为导波在管道任意点任意时间的位移。

[0016] 其中,

$$[0017] \quad u(r_j, t) = C_j \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i(k(\omega)r_j - \omega t)} d\omega$$

[0018] 式中, r_j 为导波往返传播距离, t 为时间, ω 是角频率, $F(\omega)$ 是激励波形的傅里叶变换, $k(\omega)$ 是波数, C_j 是衰减系数, i 为时间。

[0019] 在本发明的一个实施例中,求解所述稀疏向量目标方程为:

$$[0020] \quad \min \|a\|_0 \text{ s.t. } \|\Phi Da - y\|_2 \leq \varepsilon$$

[0021] 式中, a 为稀疏向量, ε 为预设误差值, \min 为最小值, y 为测量数据, D 为原子。

[0022] 在本发明的一个实施例中,所述稀疏向量的非零值的位置对应于所述过完备字典中的列数,包含缺陷位置信息,以对缺陷进行定位。

[0023] 在本发明的一个实施例中,所述稀疏向量的非零值的数值反映导波波形的幅度,以判断缺陷的严重程度,数值大小与缺陷严重程度成正比。

[0024] 本发明附加的方面和优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变得明显,或通过本发明的实践了解到。

附图说明

[0025] 本发明上述的和/或附加的方面和优点从下面结合附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解,其中:

[0026] 图1为根据本发明实施例的管道超声导波压缩感知健康监测方法流程图;

[0027] 图2为根据本发明实施例的管道超声导波监测原始数据图;

[0028] 图3为根据本发明实施例的管道超声导波压缩感知健康监测方法获得的稀疏系数图。

具体实施方式

[0029] 下面详细描述本发明的实施例,所述实施例的示例在附图中示出,其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的,旨在用于解释本发明,而不能理解为对本发明的限制。

[0030] 下面参照附图描述根据本发明实施例提出的管道超声导波压缩感知健康监测方法。

[0031] 图1是本发明一个实施例的管道超声导波压缩感知健康监测方法流程图。

[0032] 如图1所示,该管道超声导波压缩感知健康监测方法包括以下步骤:

[0033] 在步骤S1中,在待监测管道上安装超声导波发射和接收换能器。

[0034] 在本发明的一个实施例中,超声导波发射和接收换能器采用电磁超声换能器,电磁超声换能器由线圈和镍带构成,通过环氧树脂胶将镍带粘贴在待检测管道外壁,线圈置于镍带外表面,镍带经过永磁体磁化获取周向的磁场。

[0035] 本发明实施例中,换能器的线圈宽度为50mm,发射换能器和接收换能器间距200mm,本领域技术人员根据实际情况进行设定,在此不做具体限定。

[0036] 在步骤S2中,通过预设导波激励频率,使超声波发射和接收换能器接收到预设模态导波。

[0037] 在步骤S3中,对预设模态导波进行放大和滤波处理,并高速采样处理后的模态导波,得到采样数据。

[0038] 也就是说,设定导波激励频率,令发射端激发所需模态导波,接收端接收相应模态导波,并经过放大和滤波处理,然后高速采样得到采样数据。

[0039] 本发明实施例中,导波激励频率为32kHz,在管道中激发扭转模态导波,导波沿管道轴向传播,其中,导波数据的采样频率为1MHz,本领域技术人员根据实际情况进行设定,在此不做具体限定。

[0040] 在步骤S4中,对采样数据进行数字随机调制处理,得到观测矩阵和测量向量,并将测量向量存储至存储器中。

[0041] 在本发明的一个实施例中,数字随机调制包括调制和数字低通滤波器构成,其中,数字化过程可表述为矩阵乘法:

$$[0042] \quad y(n) = \Phi x(n)$$

[0043] 式中, $x(n)$ 为采样数据, Φ 为观测向量, $y(n)$ 为经过随机调制后获得的测量数据,其数据长度远远低于采样数据。

[0044] 本发明实施例中,压缩数据 $y(n)$ 的等效采样率为50kHz,数据点数远远小于原始采样数据。

[0045] 在步骤S5中,基于导波传播理论,计算传播不同距离的原子,以构建导波过完备字典。

[0046] 在本发明的一个实施例中,过完备字典的原子 D 由导波传播理论构建,原子的表达式为:

$$[0047] \quad d_j = u(r_j, t) \quad d_j \in D$$

[0048] 式中, D 为原子, $D = [d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_M]$, $j = 1, 2, \dots, M$, M 为正整数, r_j 为导波往返传播距离, t 为时间, u 为导波在管道任意点任意时间的位移。

[0049] 其中,

$$[0050] \quad u(r_j, t) = C_j \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i(k(\omega)r_j - \omega t)} d\omega$$

[0051] 式中, r_j 为导波往返传播距离, t 为时间, ω 是角频率, $F(\omega)$ 是激励波形的傅里叶变换, $k(\omega)$ 是波数, C_j 是衰减系数, i 为时间。

[0052] 在步骤S6中, 通过正交匹配追踪, 将测量向量在观测矩阵和过完备字典的乘积矩阵上进行分解, 并判断残余误差是否低于预设误差值。

[0053] 在本发明的一个实施例中, 换能器接收到的波形为过完备字典中原子的组合, 表示为:

$$[0054] \quad x = Da + e$$

[0055] 其中, a 为稀疏向量, e 为残余误差。

[0056] 进一步, 压缩感知模型可表示为:

$$[0057] \quad y = \Phi Da + e_y$$

[0058] 其中, e_y 为残余误差。

[0059] 在步骤S7中, 若残余误差低于预设误差值, 则分解迭代过程结束, 得到稀疏向量, 执行下一步骤, 若残余误差不低于误差预设值, 则执行步骤S6再次分解。

[0060] 在本发明的一个实施例中, 使用正交匹配追踪方法, 求解优化的稀疏向量 a , 求解目标方程为:

$$[0061] \quad \min \|a\|_0 \text{ s.t. } \|\Phi Da - y\|_2 \leq \varepsilon$$

[0062] 式中, a 为稀疏向量, ε 为预设误差值, \min 为最小值, y 为测量数据, D 为原子, s.t. 含义为“使得”。

[0063] 在步骤S8中, 根据稀疏向量的非零值的位置进行缺陷定位, 并根据稀疏向量的非零值的数值判断缺陷程度。

[0064] 也就是说, 根据稀疏向量 a 的非零值的位置进行缺陷定位, 根据非零值的数值大小判断缺陷的严重程度。

[0065] 具体地, 稀疏向量的非零值的位置对应于过完备字典中的列数, 包含了缺陷的位置信息, 可以对缺陷进行定位。稀疏向量的非零值的数值反映导波波形的幅度, 以判断缺陷的严重程度, 数值大小与缺陷严重程度成正比, 若数值越大, 则缺陷越严重。

[0066] 在步骤S9中, 根据预设时间间隔进行多次监测, 并将多次监测获得的数据进行压缩感知, 以得到缺陷发展趋势。

[0067] 也就是说, 每隔预定时间进行一次监测, 对多次监测数据进行压缩感知, 得到缺陷的发展趋势。

[0068] 在本发明的一个实施例中, 对多次监测数据分别进行压缩感知方法获得稀疏向量, 分析稀疏向量中非零值的位置和大小, 可判断缺陷的生成和发展规律。

[0069] 本发明实施例中, 对待监测管道, 每隔一周进行一次监测, 本领域技术人员根据实际情况进行设定, 在此不做具体限定。

[0070] 下面结合具体实施例对本发明实施例做进一步说明。

[0071] 如图2所示, 本实施例中每一周对管道监测一次, 共进行了三周。如图3所示, 稀疏系数中非零值的个数是有限的, 其位置可用于缺陷定位, 其大小可用于判断缺陷严重程度。

三次监测数据获得的稀疏系数中,最大值对应的缺陷位置分别是6.382、6.382和6.324m,且三个最大值的数值大小呈现增长的趋势,判断出缺陷严重程度在加重。对管道进行开挖验证,缺陷实际位于6.513m,因此,管道超声导波压缩感知健康监测方法对缺陷定位具有较高的精度。

[0072] 另外,本发明实施例的管道超声导波压缩感知健康监测方法的其它构成以及作用对于本领域的技术人员而言都是已知的,为了减少冗余,不做赘述。

[0073] 根据本发明实施例提出的管道超声导波压缩感知健康监测方法,通过存储压缩后的导波数据,从而大大减小了数据存储量,同时保证缺陷的监测精度,具有广阔的实际应用前景。

[0074] 在本说明书的描述中,参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不必针对的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。此外,在不相互矛盾的情况下,本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

[0075] 此外,术语“第一”、“第二”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此,限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。在本发明的描述中,“多个”的含义是至少两个,例如两个,三个等,除非另有明确具体的限定。

[0076] 流程图中或在此以其他方式描述的任何过程或方法描述可以被理解为,表示包括一个或更多个用于实现定制逻辑功能或过程的步骤的可执行指令的代码的模块、片段或部分,并且本发明的优选实施方式的范围包括另外的实现,其中可以不按所示出或讨论的顺序,包括根据所涉及的功能按基本同时的方式或按相反的顺序,来执行功能,这应被本发明的实施例所属技术领域的技术人员所理解。

[0077] 在流程图中表示或在此以其他方式描述的逻辑和/或步骤,例如,可以被认为用于实现逻辑功能的可执行指令的定序列表,可以具体实现在任何计算机可读介质中,以供指令执行系统、装置或设备(如基于计算机的系统、包括处理器的系统或其他可以从指令执行系统、装置或设备取指令并执行指令的系统)使用,或结合这些指令执行系统、装置或设备而使用。就本说明书而言,“计算机可读介质”可以是任何可以包含、存储、通信、传播或传输程序以供指令执行系统、装置或设备或结合这些指令执行系统、装置或设备而使用的装置。计算机可读介质的更具体的示例(非穷尽性列表)包括以下:具有一个或多个布线的电连接部(电子装置),便携式计算机盘盒(磁装置),随机存取存储器(RAM),只读存储器(ROM),可擦除可编程只读存储器(EPROM或闪速存储器),光纤装置,以及便携式光盘只读存储器(CDROM)。另外,计算机可读介质甚至可以是可在其上打印所述程序的纸或其他合适的介质,因为可以例如通过对纸或其他介质进行光学扫描,接着进行编辑、解译或必要时以其他合适方式进行处理来以电子方式获得所述程序,然后将其存储在计算机存储器中。

[0078] 应当理解,本发明的各部分可以用硬件、软件、固件或它们的组合来实现。在上述实施方式中,多个步骤或方法可以用存储在存储器中且由合适的指令执行系统执行的软件

或固件来实现。如,如果用硬件来实现和在另一实施方式中一样,可用本领域公知的下列技术中的任一项或他们的组合来实现:具有用于对数据信号实现逻辑功能的逻辑门电路的离散逻辑电路,具有合适的组合逻辑门电路的专用集成电路,可编程门阵列(PGA),现场可编程门阵列(FPGA)等。

[0079] 本技术领域的普通技术人员可以理解实现上述实施例方法携带的全部或部分步骤是可以通程序来指令相关的硬件完成,所述的程序可以存储于一种计算机可读存储介质中,该程序在执行时,包括方法实施例的步骤之一或其组合。

[0080] 此外,在本发明各个实施例中的各功能单元可以集成在一个处理模块中,也可以是各个单元单独物理存在,也可以两个或两个以上单元集成在一个模块中。上述集成的模块既可以采用硬件的形式实现,也可以采用软件功能模块的形式实现。所述集成的模块如果以软件功能模块的形式实现并作为独立的产品销售或使用,也可以存储在一个计算机可读取存储介质中。

[0081] 上述提到的存储介质可以是只读存储器,磁盘或光盘等。尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例,可以理解的是,上述实施例是示例性的,不能理解为对本发明的限制,本领域的普通技术人员在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

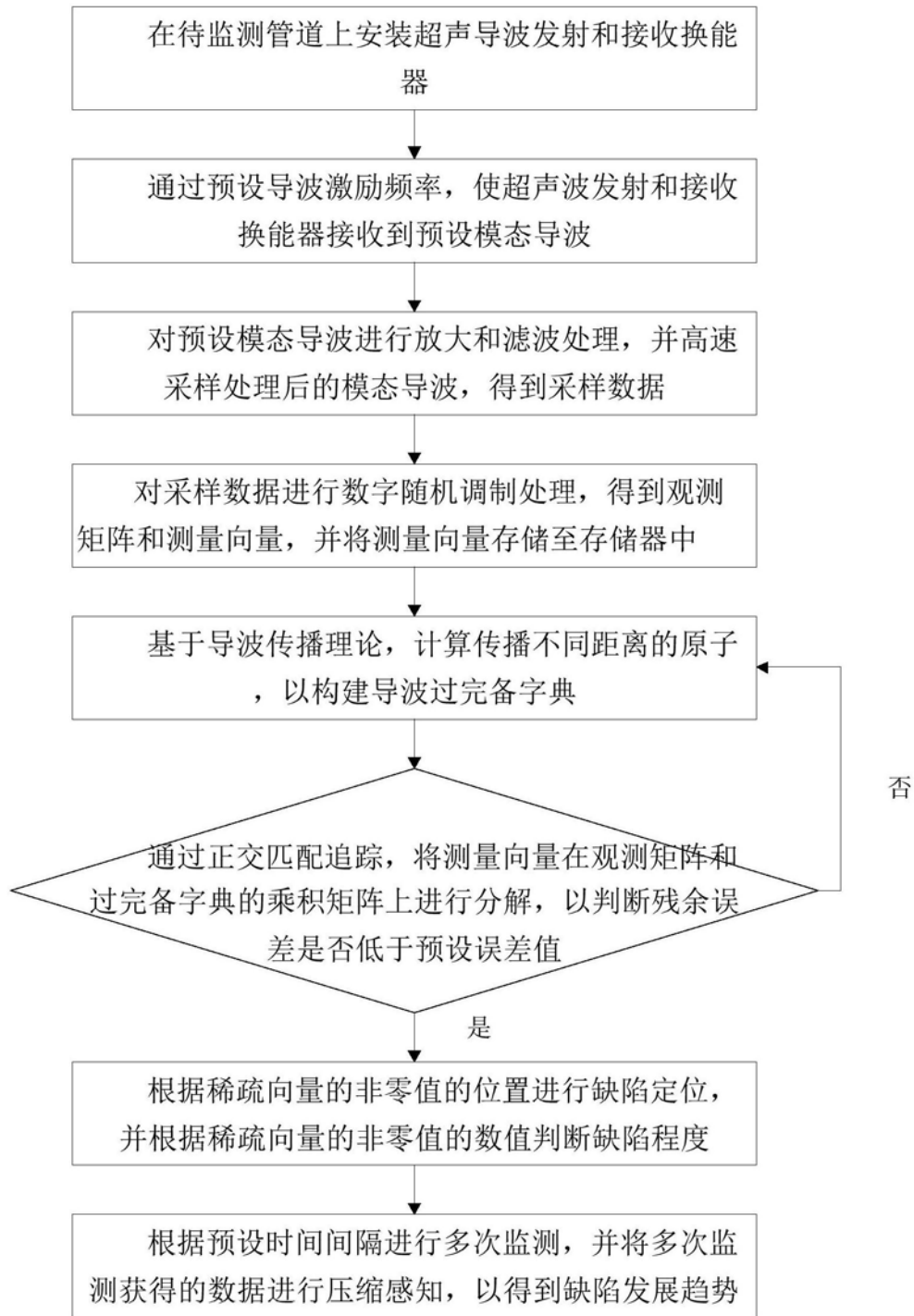


图1

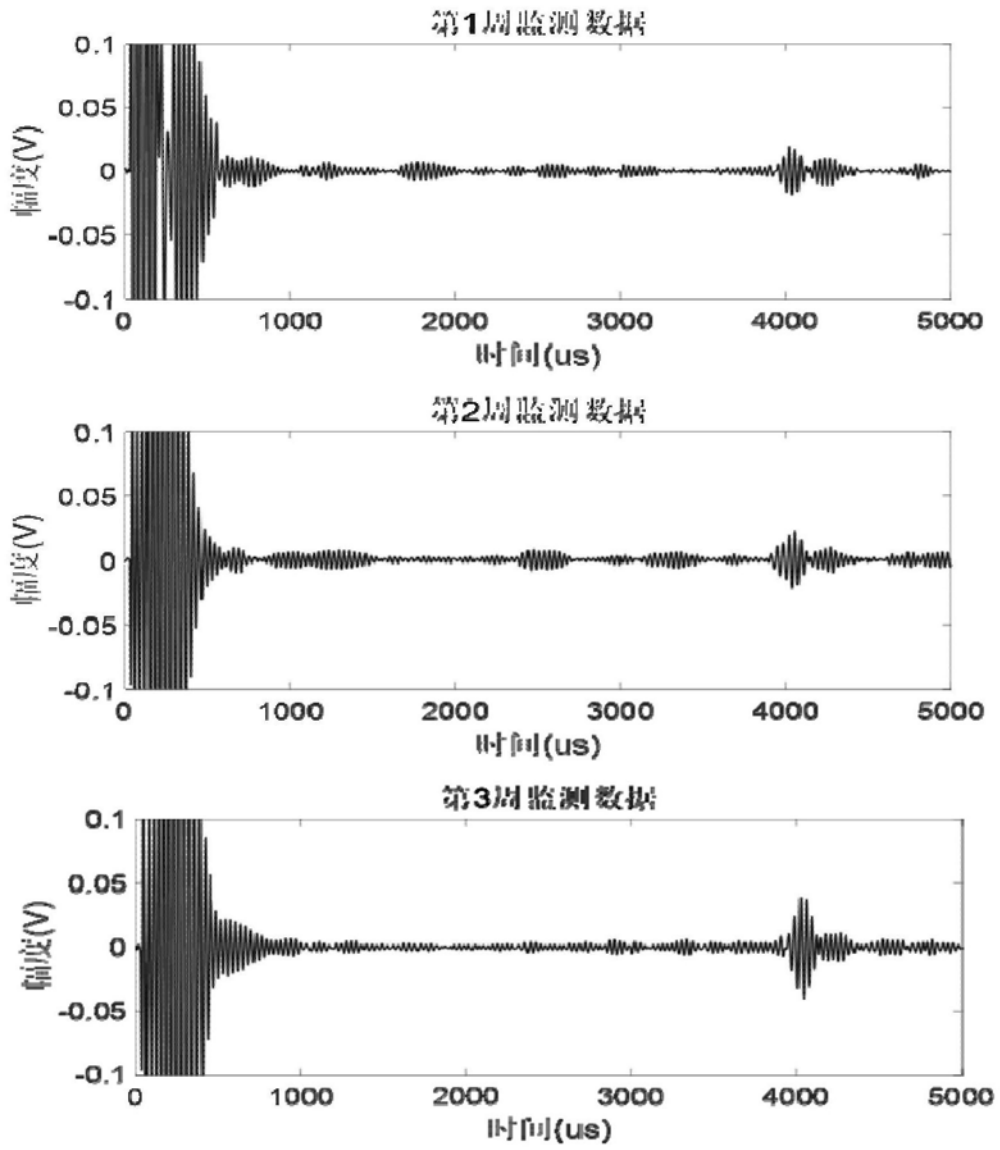


图2

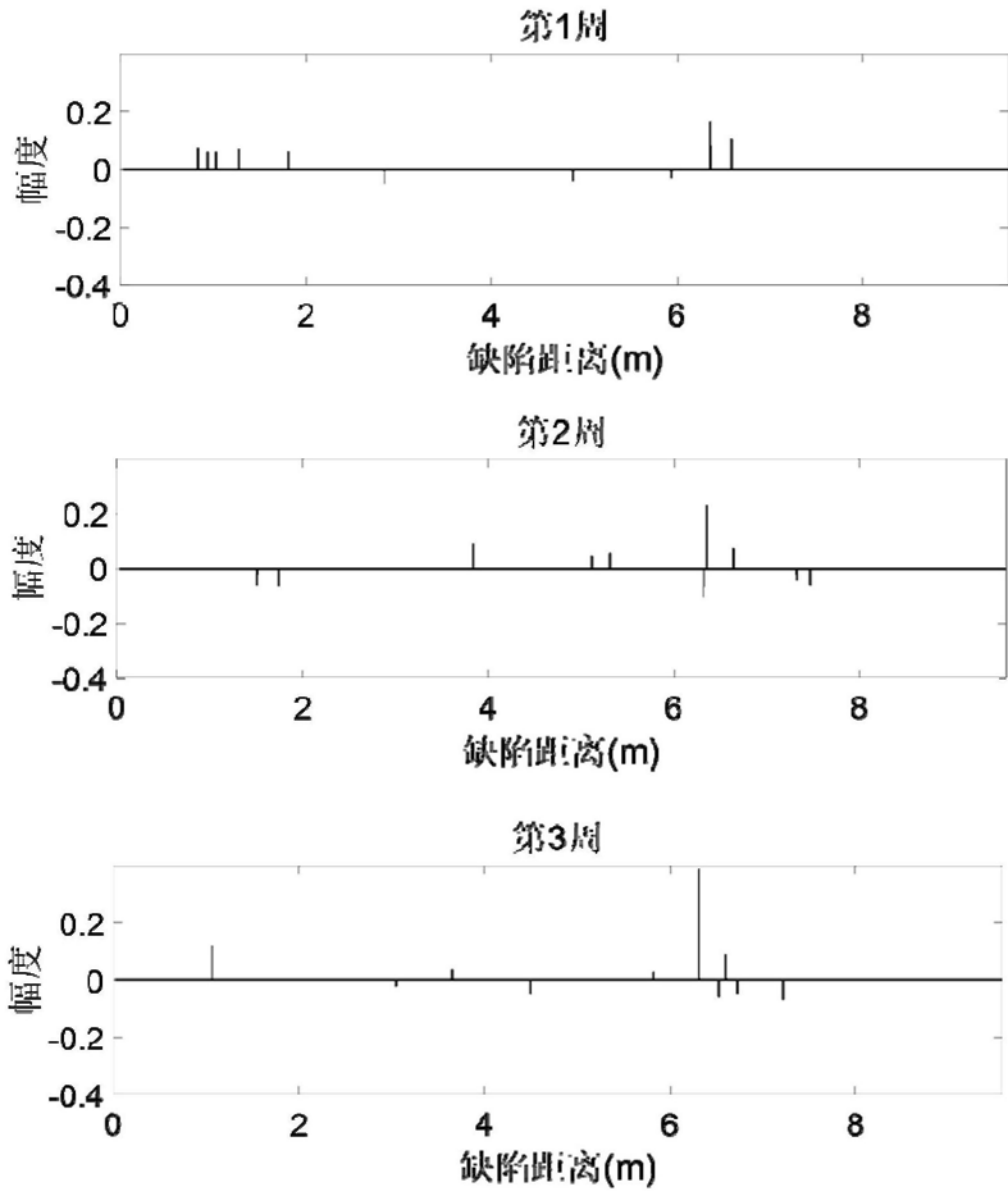


图3