

纪念王威琪院士诞辰 85 周年

利用时域叠加的声学成像法定位埋地 PE 管道*

葛 亮¹ 何 建¹ 高 艳^{2†} 肖小汀³ 吴佳晔¹ 王 甜¹

(1 西南石油大学 机电工程学院 成都 610500)

(2 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(3 西南石油大学 电气信息学院 成都 610500)

2023 年 7 月 13 日收到

2023 年 9 月 1 日定稿

摘要 针对现有埋地管道探测技术难以确定聚乙烯 (PE) 管道埋深且通常对管线走向的探测误差较大的问题, 提出了优化的时域叠加声学成像法。利用该方法对仿真信号进行直达波与表面波消除、反射波提取和成像定位处理, 验证了方法的可行性。最后, 对埋深 0.4 m 和 1.0 m 的 PE 管进行定位测试实验, 最大管线平面定位误差分别为 0.179 m 和 0.240 m, 说明该方法基本满足较好埋地条件 PE 管道探测的需求。

关键词 管线定位, 聚乙烯管道, 声学成像, 时域叠加

PACS 数 43.58, 43.60

DOI: 10.12395/0371-0025.2023128

Acoustic imaging detection using time domain stacking for buried polyethylene pipelines

GE Liang¹ HE Jian¹ GAO Yan^{2†} XIAO Xiaoting³ WU Jiaye¹ WANG Tian¹

(1 School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University Chengdu 610500)

(2 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100190)

(3 School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University Chengdu 610500)

Received Jul. 13, 2023

Revised Sept. 1, 2023

Abstract The existing technologies for buried pipeline localization are difficult to determine the depth of polyethylene pipelines, and the detection error for pipeline direction is often significant. To solve this problem, an acoustic imaging method based on optimized time domain stacking is proposed. The method is used to eliminate direct wave and surface wave, extract reflected wave and perform imaging positioning processing on simulation signals, which verifies the feasibility of the method. Finally, the pipeline localization experiments are carried out on the polyethylene pipes with buried depths of 0.4 m and 1.0 m respectively. The experimental results show that the maximum pipeline positioning errors are 0.179 m and 0.240 m, respectively. This indicates that the proposed method may meet the requirements of PE pipeline detection under better buried conditions.

Keywords Pipeline localization, Polyethylene pipe, Acoustic imaging, Time domain stacking

引言

在现代化城市地下管网建设工程中, 聚乙烯 (PE) 管因其优点被广泛应用^[1]。但地下管网经常因

施工等原因遭受工程机械的破坏, 严重时会造成重大危害^[2]。由于 PE 管道不导电也不导磁, 传统管道探测技术无法有效地进行探测与定位^[3], 声学管道探测技术^[4]则不受探测对象电学性质的影响, 能够对埋地 PE 管道进行探测定位。

* 成都市国际科技合作资助项目 (2020-GH02-00016-HZ)、省科技计划项目 (2023ZHCG0020) 和西南石油大学自然科学“启航计划”项目 (2023QHZ003) 资助

† 通讯作者: 高艳, gaoyan@mail.ioa.ac.cn

声学管道探测技术根据激发声波的方式可以分为管道激励法和地震反射波法^[5-6]。管道激励法通过向管道内发射声波^[7],检测从管道内部传播到地面的声波进行定位,该方法需要找到适合发射声波的管道接口,且只能确定管道的水平位置及走向;地震反射波法通过在地面激发声波,检测传播到管道再被反射回地面的声波进行定位。地震反射波法操作便捷,受环境限制较小,除能确定管道水平位置和走向外,该方法还能确定管道埋深。针对地震反射波法的研究, Sugimoto 等^[8]最先使用水平偏振剪切波与地震波探测技术中的共深度点叠加技术结合进行实验,证明了共深度点叠加技术在浅埋物探中的可行性。之后 Yoshizumi 等^[9]引入反褶积法减少成像图重影,改善了极浅埋地下成像图。Papandreou 等^[10]应用地震波对浅掩埋物体探测技术进行系统研究,通过电磁激振器激发地震波,求解激励信号与检波器信号的广义互相关函数,并应用改进的成像算法进行地下成像定位。在此基础上, Muggleton 等^[11]采用剪切波对掩埋管道进行探测,以激励信号作为参考计算互相关函数,减少了其他振动源的干扰,并成功检测到掩埋管道。目前,国外声学探测技术基本处于实验室测试阶段,同时国内对相关技术的研究近几年也取得了一系列的成果。支雁飞等^[12-13]提出了瑞利波地震映像法探测地下管线,并通过仿真模拟和工程实例验证了方法的可行性。Chen 等^[14]研究了管道掩埋深度、管径以及混合土壤介质对检波器接收信号的影响,并通过仿真证实了利用声学技术探测埋地管道的可行性。葛亮等^[15]提出利用时域叠加法对埋地 PE 管进行定位,并通过实验验证了该方法的可行性。Holmes 等^[16]提出的全矩阵聚焦超声检测技术也采用叠加技术处理回波实现缺陷的成像定位,可对整个被检区域聚焦获得高质量的超声图像,被广泛应用于高温氢蚀、多种氢致开裂损伤、应力腐蚀裂纹类等危害性缺陷检测^[17-18],但超声波在土壤中能量衰减大导致定位困难,因此该技术尚未被应用于埋地管道探测。

目前,国外的声学埋地探测技术已处于改善探测性能阶段,而国内基本还处于理论研究和仿真阶段^[19]。该方法的关键是对检测信号进行处理分析,目前国内相关研究较少。本文基于时域叠加法提出了优化的定位信号处理方法,根据波速、信号激励时长和传播距离之间的关系对初始信号进行干扰消除和反射波提取,并利用时域叠加法进行成像定位,最后搭建实验平台并进行测试,验证了定位信号处理方法的可行性。

1 埋地 PE 管道声学探测原理

埋地 PE 管道声学探测方法利用声波反射原理进行管道定位,其工作原理^[15]为,沿垂直管线方向布置若干等间距测量线,每条测量线上设置一个振源和多个等间距检波器,振源可放置在测量线上任意两个相邻检波器的中间,检波器的数量和间距可根据管道埋深和现场条件确定,同时可根据现场条件调整振源与检波器的位置,如图 1 所示。

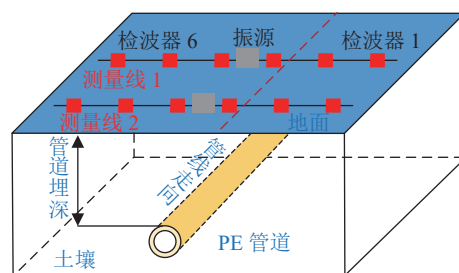


图 1 埋地管道定位测量线布置图

振源在地面激发声波向土壤中传播,声波传播过程如图 2 所示。声波在传播过程中遇到声学特性不同的介质时,将在分界面发生反射、透射并伴随波形转换^[20-21],因此部分声波会被 PE 管反射至土壤表面并被检波器接收,而这部分声波携带管道位置信息,故可利用反射波进行管道定位。由于埋地 PE 管道声学探测法仅使用反射波进行成像定位,所以本文仅分析声波反射过程。通常情况下,入射纵波(P波)经管道反射后会以反射纵波(R_P 波)和转换的反射横波($R_P S$ 波)继续传播,入射横波(S波)经管道反射后会以反射横波($R_S S$ 波)和转换的反射纵波($R_S P$ 波)继续传播, $R_P S$ 波和 $R_S P$ 波的传播路径与 R_P 波和 $R_S S$ 波传播路径相同。声波耦合到土壤中时,不仅会产生横波和纵波,还会产生沿着地表传播的表面波,其主要成分为瑞利波^[22]。研究表明,瑞利波沿深度方向衰减很快,仅存在于大约一个波长的深

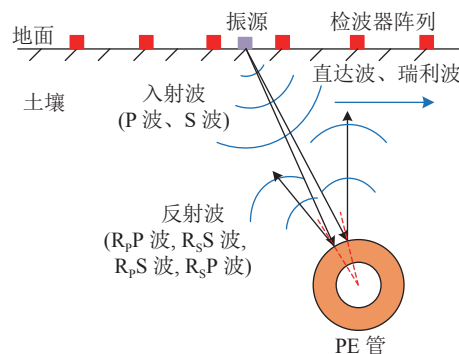


图 2 声波传播模型

度内, 而沿水平方向比体波衰减慢, 且能量较大^[23]; 同时, 会有部分声波未经过管道反射直接从土壤表面传播至检波器阵列, 这部分声波通常称为直达波, 由于传播距离较短所以直达波能量比反射波能量大, 因此在利用反射波进行管道定位时需对检波器信号进行直达波消除、瑞利波消除和反射波提取。

选择任意一条测量线, 沿测量线作垂直于地面的测量面, 检波器从左至右依次排列, 振源位于检波器阵列中心位置, 以测量线为 x 轴建立直角坐标系, 如图 3 所示。声波从振源传播到土壤-管道分界面, 再被分界面反射至第 i 个检波器的传播距离 s_i 和传播时间 t_i 分别为

$$s_i = \sqrt{H^2 + (x_0 - 2.5d)^2} + \sqrt{H^2 + [(i-1)d - x_0]^2}, \quad (1)$$

$$t_i = s_i / c, \quad (2)$$

式中, H 为管道埋深, m; d 为检波器间距, m; x_0 为管道中心到 y 轴距离, m; c 为声速, m/s; i 取整数 1~6。

设激励信号作用于振源的起始时间为 0, 则第 i 个检波器接收到反射信号的起始时间为 t_i 。由于检波器离振源距离不同, 拾取的回波信号存在时延, 若将各检波器的输出信号 y_i 在时域中向左平移 t_i , 则各检波器的输出信号将在时间轴上对齐, 只存在幅值差异。对管道定位时可将测量面按一定步长离散化, 划分为 $m \times n$ 个正方形单元, 划分长度一般不超过管道直径, 每个单元坐标为 (m, n) 。由于管道位置未知, 可假设第 m 行第 n 列的单元为管道位置或其附近位置, 计算声波到达单元几何中心再反射回各检波器的传播时间 $t_{i,m,n}$, 将各检波器信号在时间轴上向左平移对应的传播时间 $t_{i,m,n}$, 此时各检波器信号将在时间轴上对齐; 假设第 m 行第 n 列的单元不是管道位置或其附近位置, 则将各检波器信号在时间轴上向左平移对应的传播时间 $t_{i,m,n}$ 后, 检波器信号在时间轴上不对齐。最后将平移后的各检波器信号相加, 获得叠加值 $M_{m,n}$ ^[24]。

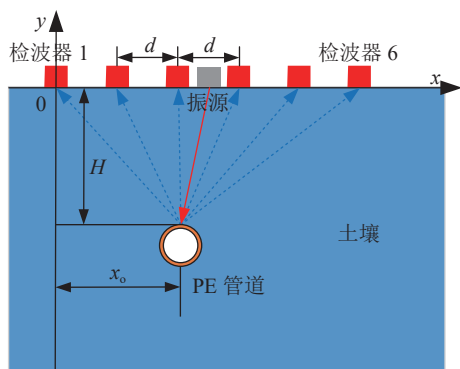


图3 二维测量面示意图

$$M_{m,n} = \int_0^\tau \sum_{i=1}^6 y_{i,m,n}(t) dt, \quad (3)$$

式中, τ 为激励信号持续时间, s; $y_{i,m,n}$ 为各检波器输出信号平移 $t_{i,m,n}$ 后的信号。

显然, 处于管道真实位置或其附近位置的单元叠加值最大。因此, 在 $m \times n$ 个叠加值中找到最大值, 则认为最大值所在单元的坐标就是管道位置。根据该方法的处理特点, 将其称为时域叠加法^[15]。使用时域叠加法进行成像定位时需计算各单元的传播时间 t 并将信号在时间轴上向左平移 t , 因此在进行探测前需测量土壤中的声速以便获得各单元传播时间 t 。

2 埋地 PE 管道声学定位仿真分析

2.1 仿真实验模型

利用 COMSOL 软件搭建的二维模型如图 4 所示。模型中有检波器、振源和 PE 管等, 检波器间距为 0.3 m, 检波器数量为 4, 激励信号为 500 Hz 雷克子波, 管道埋深为 1.9 m。常用管道回填土为紧密砂, 因此将紧密砂作为仿真材料, 具体材料参数如表 1 所示。

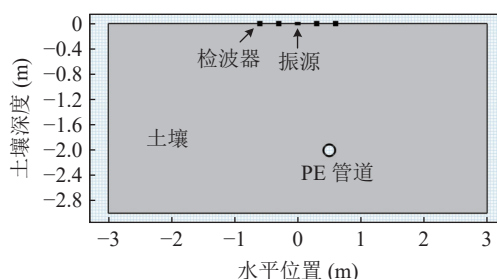


图4 几何模型

表1 材料参数

材料	纵波波速 C_p (m/s)	横波波速 C_s (m/s)	密度 ρ (kg/m^3)
紧密砂	236.36	126.34	2000
PE管	2182.2	890.87	900

仿真得到 3 个不同时刻土壤中的声波 y 方向位移场分布云图如图 5 所示。由图 5(a) 可知, 由于 $C_p > C_s$, 所以 P 波在 S 波前传播, P 波将最先到达土壤-管道分界面。由图 5(b)(c) 可知, P 波和 S 波在到达土壤-管道分界面时会发生反射并伴随波形转换, 而瑞利波沿地表传播且传播速度略低于 S 波。同时, 由图 5(a) 可知, 声波还未传播到管道时, 检波器就已经接收到了直达波 (直达 P 波和直达 S 波) 和瑞利波。而直达波和瑞利波会对成像定位造成很大影响, 因此需要对信号进行直达波消除和瑞利波消除。

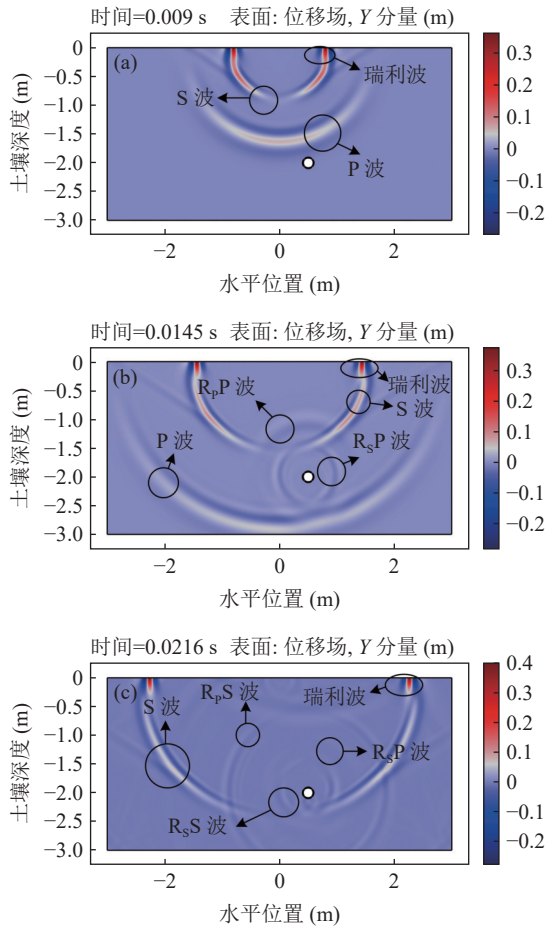


图5 不同时刻声波 y 方向位移云图 (a) 0.009 s; (b) 0.0145 s; (c) 0.0216 s

2.2 直达波与瑞利波消除

仿真实验得到四路声波信号,如图6所示。由检波器1的波形分析可知,最先到达检波器的是直达波和瑞利波,因为检波器距离振源较近,所以直达波和瑞利波未分开,波形发生重叠。在直达波和瑞利波后到达检波器的是 R_pP 波,幅值相比于其他反射波较大。之后到达检波器的是发生重叠的 R_pS 波和 R_sP 波,最后到达检波器的是 R_sS 波,由于瑞利波能量太强,导致无法直观地观察到 R_sS 波,因此未在图中标出 R_sS 波部分。由图6可知,直达波和瑞利波与反射波完全分开,可直接舍弃直达波和瑞利波将其消除,且不会对反射波造成任何损失。

设第 i 个检波器到振源的距离为 s_i ,直达 P 波到达检波器的时间为 t_{Pi} ,直达 S 波到达检波器的时间为 t_{Si} , P 波波速为 C_P , S 波波速为 C_S ,瑞利波波速为 C_R ,则

$$t_{Pi} = s_i / C_P, \quad t_{Si} = s_i / C_S, \quad t_{Ri} = s_i / C_R, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (4)$$

信号激励时长为 τ ,因此将 $[t_{Pi}, t_{Pi+\tau}]$ 区间、 $[t_{Si}, t_{Si+\tau}]$

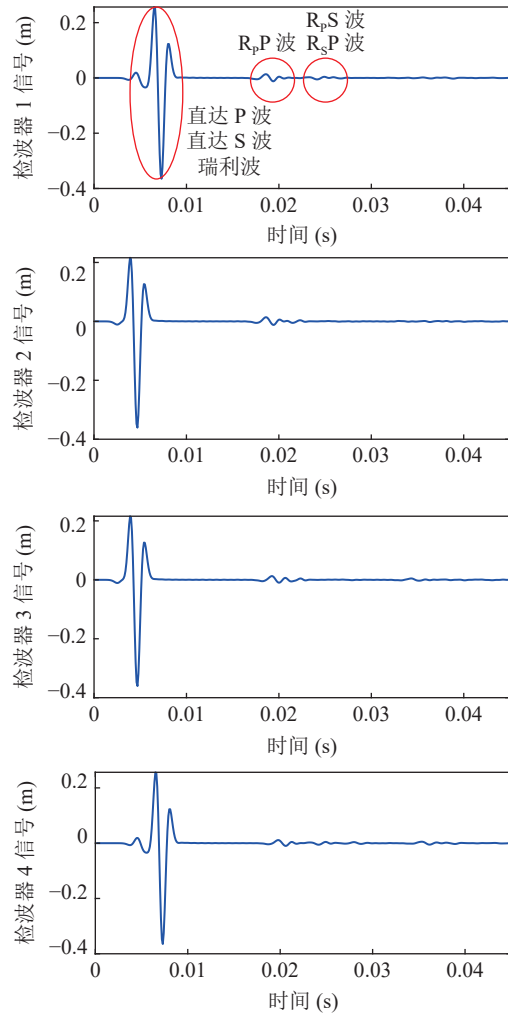


图6 四路检波器信号波形图

区间和 $[t_{Ri}, t_{Ri+\tau}]$ 区间内的信号置零,其余信号不作处理,即可将直达波和瑞利波消除,消除后的信号波形如图7所示。

事实上,当管道埋深较浅(小于1 m)时,由于传播距离较短,直达波、瑞利波和反射波到达检波器的时间差过小导致波形产生部分重叠,无法直接舍弃直达波和瑞利波。此时可以通过缩短激励信号时长来增大时间差,将直达波和瑞利波与反射波分开,再进行直达波和瑞利波消除。

2.3 反射波提取

根据仿真分析可知, R_pP 波最先反射回地面被检波器拾取,且 R_pP 波幅值比其他反射波大,更有利于管道定位计算,因此选取 R_pP 波用于管道定位。仿真模型中,激励信号为 500 Hz 的雷克子波,波形如图8所示。信号激励时长为 τ ,且关于峰值左右对称,以峰值点划分将信号时长平分为 dt_1 和 dt_2 两部分。通过仿真实验发现反射波波形与激励信号波形基本相同,因此,可以在直达波和瑞利波消除后的信

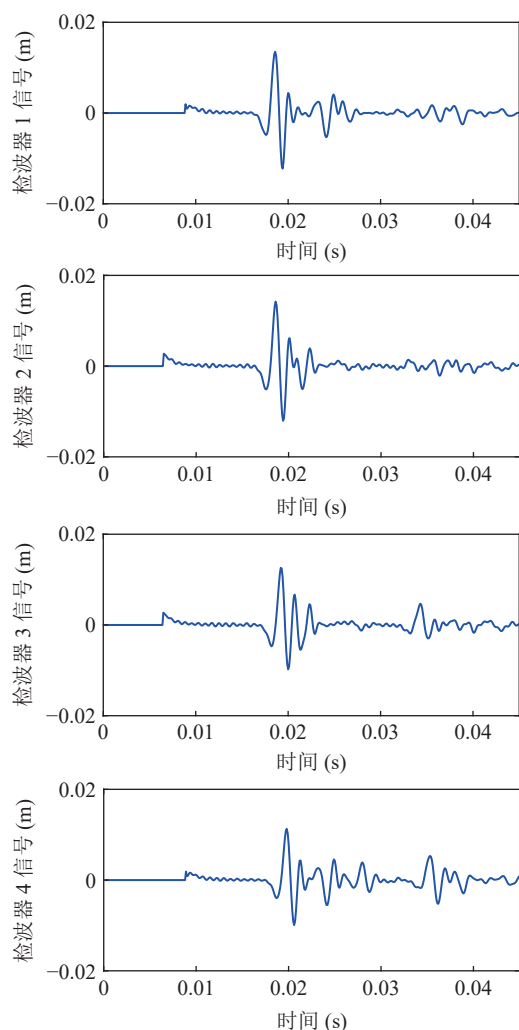


图7 消除直达波后的信号

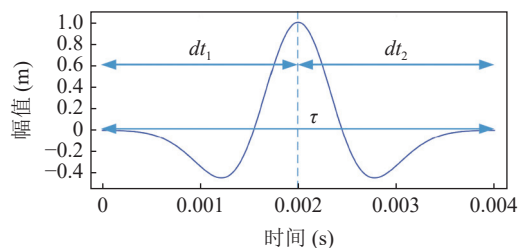


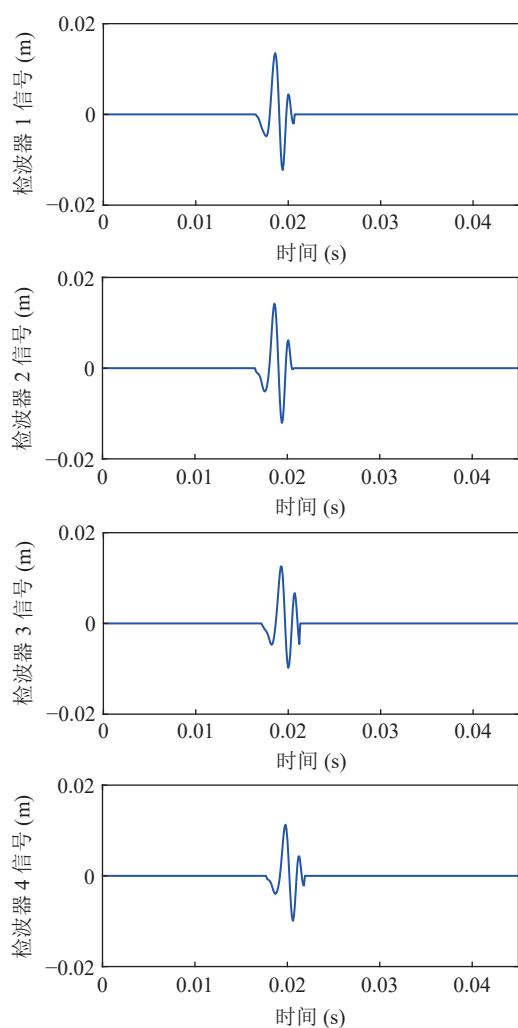
图8 雷克子波波形图

号中找到峰值数据,并以峰值所在的时刻为对称点向左和向右分别截取 dt_1 , dt_2 时长的波形,此时认为截取出来的波形即为提取出来的 R_pP 波。

按上述方法对图7的各路信号进行处理,提取出的 R_pP 波如图9所示,信号中均只存在 R_pP 波,可直接用于 PE 管道成像定位计算。

2.4 基于时域叠加的声学成像结果分析

先对模型中的定位区域进行网格单元划分,划分长度可根据管道外径选择,选择划分长度为 0.01 m,因此可以划分出 180000 个单元,每个单元坐

图9 提取出的 R_pP 波

标为 (m, n) 。假设每个单元的几何中心点为管道反射点,已知振源、检波器和反射点坐标,便可计算纵波从振源传播到反射点再返回到检波器的传播时间。再根据传播时间 t 将图9中四路检波器的 R_pP 波在时间轴上向左平移 t ,并把平移后的信号进行叠加,得到每个单元对应的叠加值 $M_{m,n}$ 。将叠加值 $M_{m,n}$ 进行处理得到一个 600×300 的叠加值矩阵 $\mathbf{M}$,用伪彩图将矩阵 $\mathbf{M}$ 元素值表示出来,即可对地下二维横截面定位区域进行成像。

成像结果如图10所示,管道及其附近位置单元颜色较亮,通过软件寻找亮度最大的单元即叠加值最大的单元,此时认为彩色成像图中颜色最亮的区域即为管道所在区域,PE 管道实际位置为图中黑色圆圈处。图中颜色最亮的单元中心坐标为 $(0.495, -1.925)$ m,而管道顶点坐标为 $(0.5, -1.9)$ m,采用实际管道顶点与定位结果两点之间的距离作为定位误差,则可以计算出水平误差为 0.005 m,埋深误差为 0.025 m,定位误差为 0.025 m。由于无法保证管道顶

点位置恰好处于网格单元的几何中心,因此网格的划分长度会对定位产生影响,只考虑网格划分的影响时,可产生的最大定位误差为网格划分长度的 $\sqrt{2}/2$ 倍,可见划分长度越短,定位误差越小,成像图越清晰。但网格划分长度越小计算量越大,为在保证定位精度的同时减少计算量,后续的网格长度都设置为 0.01 m。计算过程中数据处理等也会造成误差,但仿真结果满足埋地 PE 管道定位的需求,并且该方法操作便捷,能够较为准确地确定管道埋深。因此,仿真结果验证了埋地 PE 管道定位成像原理和定位信号处理方法的可行性。

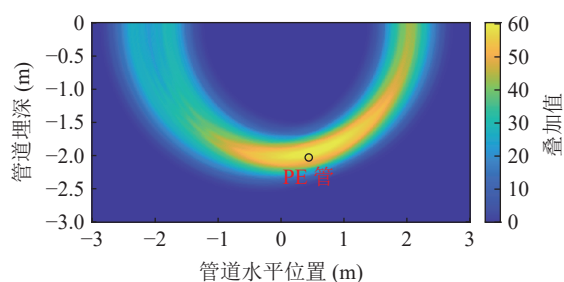


图 10 管道定位成像图

3 埋地 PE 管道定位实验

搭建埋地 PE 管道声学探测平台进行现场测试与分析,如图 11 所示。实验装置包括扬声器、纵波检波器阵列、数据采集卡、滤波模块、直流变压器等,并设置了埋深分别为 0.4 m 和 1.0 m 的 PE 管道。由于瑞利波能量过大,会对管道定位造成很大影响,因此在实验时采用纵波检波器对瑞利波进行初步抑制处理。定位测试前现场测量土壤波速,管道埋深 0.4 m 和 1.0 m 的环境下土壤声速分别为 231 m/s 和 256 m/s。

对 0.4 m 埋深管道进行定位时,在地面上设置了两条测量线,如图 12 所示。本次实验使用主频率为

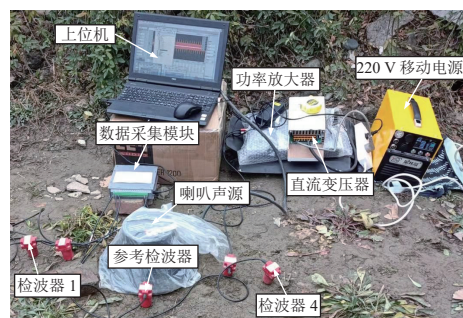


图 11 实验仪器组成图

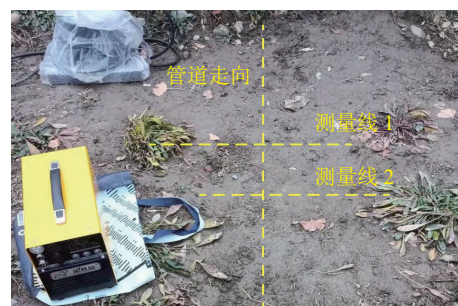


图 12 0.4 m 埋深 PE 管道定位测试

1000 Hz 的雷克子波作为激励信号。在两条测线上均进行 10 次管道定位测试。测线 1 上管道水平位置在 $-0.07 \sim 0.14$ m, 其埋深在 0.325~0.395 m, 而管道实际顶点在 (0, -0.4) m, 可计算出最大水平误差为 0.14 m, 最大埋深误差为 0.075 m, 则最大定位误差为 0.159 m; 测线 2 上管道水平位置在 0.095~0.295 m, 其埋深在 0.31~0.385 m, 而管道实际顶点在 (0.25, -0.4) m, 可计算出最大水平误差为 0.155 m, 最大埋深误差为 0.09 m, 则最大定位误差为 0.179 m。图 13 为两条测线某次定位探测得到的地下区域成像图。

对 1 m 埋深管道进行定位时,在地面上设置了四条测量线,其中测线 1、测线 2 和测线 3 与管道走向垂直,测线 4 与管道走向只相交不垂直,如图 14 所示。本次实验使用主频率为 500 Hz 的雷克子波作为

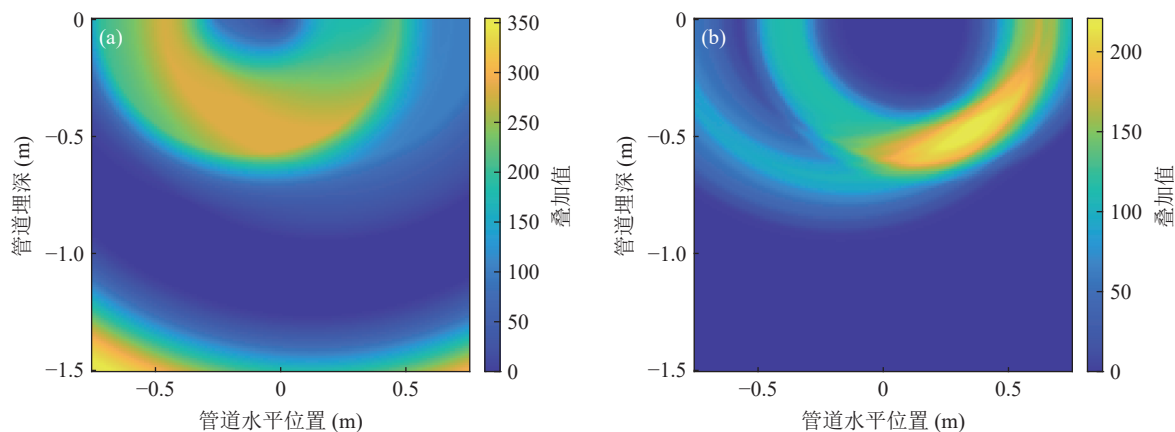


图 13 0.4 m 测线下方定位区域成像图 (a) 测线 1; (b) 测线 2



图 14 1 m 埋深 PE 管定位测试

激励信号。在四条测线上均进行 10 次管道定位测试。测线 1 上管道水平位置在 $-0.125 \sim 0.125$ m, 其埋深在 $0.833 \sim 0.895$ m; 测线 2 上的管道水平位置在 $0.125 \sim 0.375$ m, 其埋深在 $0.845 \sim 0.875$ m; 测线 3 上的管道水平位置在 $-0.375 \sim -0.15$ m, 其埋深在 $0.875 \sim 0.9375$ m; 测线 4 上的管道水平位置在 $-0.15 \sim 0.15$ m, 其埋深在 $0.8125 \sim 0.9375$ m, 计算得到各测线的最大水平误差、最大埋深误差和最大定位误差, 如表 2 所

表 2 不同测线的误差分析

测线编号	测线1	测线2	测线3	测线4
管道顶点实际坐标 (m)	(0, -1)	(0.25, -1)	(-0.2, -1)	(0, -1)
最大水平误差 (m)	0.125	0.125	0.125	0.150
最大埋深误差 (m)	0.167	0.155	0.125	0.188
最大定位误差 (m)	0.209	0.199	0.215	0.240

示。由此可知, 管道探测时测线不一定垂直于管线, 两者仅需相交便可。图 15 为四条测线某次定位探测得到的地下区域成像图。

对定位误差进行分析可知, 实际探测时环境中许多噪声干扰, 虽然使用滤波模块对检波器信号进行滤波处理, 但还是存在部分噪声干扰信号; 同时, 即使使用了纵波检波器对瑞利波进行抑制并且通过算法对直达波和瑞利波进行消除, 但是仍有部分直达波和瑞利波与反射波发生重叠, 因此实验存在定位误差。

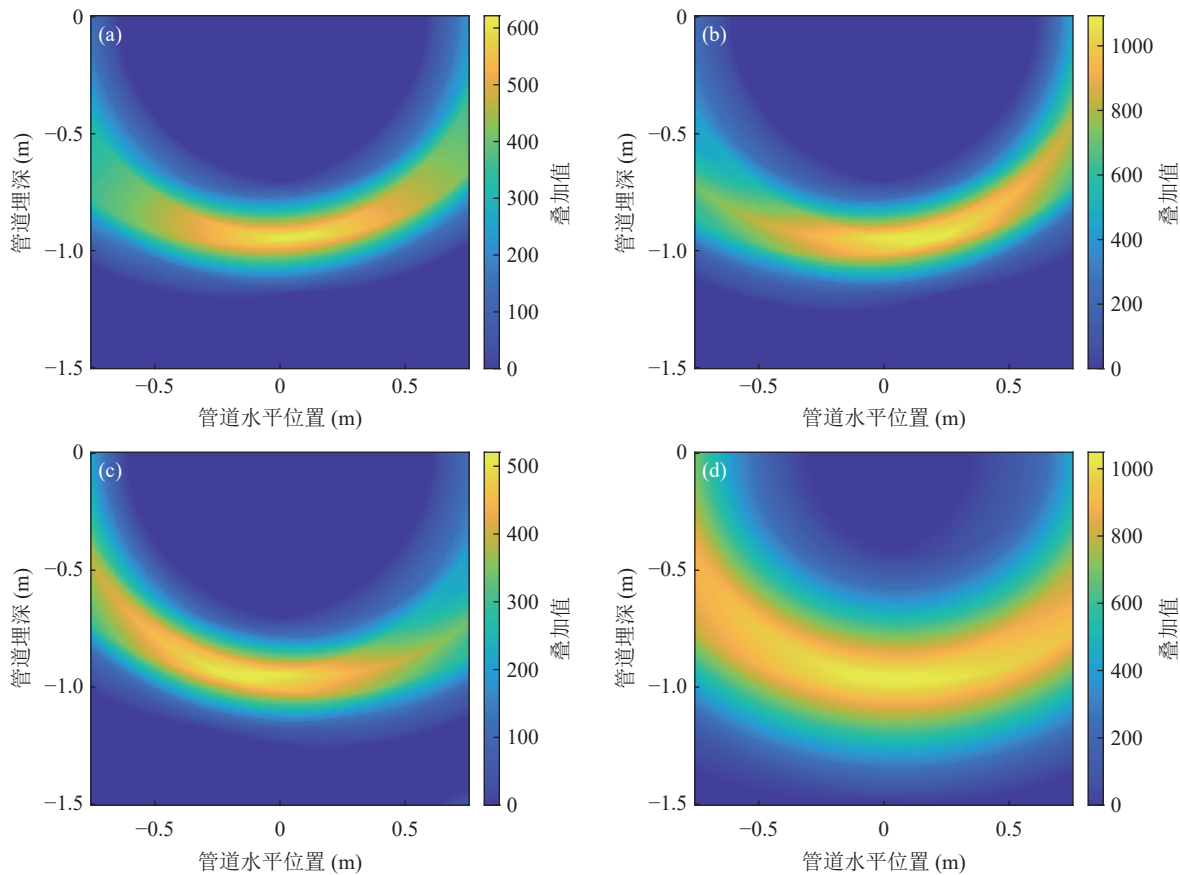


图 15 1 m 测线下方定位区域成像图 (a) 测线 1; (b) 测线 2; (c) 测线 3; (d) 测线 4

4 结论

本文提出了优化的时域叠加声学成像法, 实现了埋地 PE 管道声学探测。通过仿真和实验验证了

所提方法的可行性, 结果表明: 检波器接收的信号主要包括直达波、瑞利波和反射波, 且反射波中的 R_pP 波能更好地实现定位成像; 当管道埋深较大时, 直达波和瑞利波与反射波不会发生重叠, 可将直达波和瑞利波信号置零; 当管道埋深较小时, 可采用提高激

励信号频率的方式缩短激励时长,避免传播距离短造成直达波和瑞利波与反射波重叠;提取 R_pP 波时可根据激励信号的特点对回波信号进行截取处理,实现 R_pP 波的提取;在进行成像定位时,可通过细化网格降低误差;管道探测时测量线无需垂直于管线,两者相交即可。

所提优化的时域叠加声学成像法针对埋地 PE 管道定位的准确度较高。此外,虽然利用提出的信号处理方法对直达波和瑞利波进行了消除,但仍有部分直达波和瑞利波与反射波发生重叠。后续工作将进一步考虑直达波和瑞利波的影响,完善和优化声学成像方法。

参 考 文 献

- 1 彭善碧, 赵蓓雯, 卢泓方, 等. 国外石油天然气行业非金属管道检测技术. *中国安全生产科学技术*, 2022; **18**(12): 49–57
- 2 李明阳, 陈国华, 严大鹏, 等. 挖掘过程对含缺陷埋地 PE 管影响有限元分析. *塑料*, 2019; **48**(6): 87–90
- 3 邓诗凡, 张智华, 李想, 等. 城市老旧小区内外业一体化给水管线探测. *地球物理学进展*, 2019; **34**(5): 1996–2001
- 4 高艳, 崔希望, 靳伯骞, 等. 一种基于声波反射的埋地管线探测装置及方法: CN 108333623A. 2018-07-27
- 5 Ge L, Zhang C P, Tian G Y, *et al.* Current trends and perspectives of detection and location for buried non-metallic pipelines. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2021; **34**(1): 1–29
- 6 李广才, 李培, 姜春香, 等. 我国城市地球物理勘探方法应用进展. *地球物理学进展*, 2023; **38**(4): 1799–1814
- 7 Muggleton J M, Brennan M J, Gao Y. Determining the location of buried plastic water pipes from measurements of ground surface vibration. *J. Appl. Geophys.*, 2011; **75**(1): 54–61
- 8 Sugimoto T, Okujima M. Underground imaging using shear waves: Stacking method of the reflected scattered waves. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996; **35**: 3105
- 9 Yoshizumi N, Sugimoto T. Improvement of underground image (III): Underground imaging using shear waves. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001; **40**(5): 3621–3622
- 10 Papandreou B, Brennan M J, Rustighi E. On the detection of objects buried at a shallow depth using seismic wave reflections. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2011; **129**(3): 1366–1374
- 11 Muggleton J M, Papandreou B. A shear wave ground surface vibration technique for the detection of buried pipes. *J. Appl. Geophys.*, 2014; **106**: 1–36
- 12 张献民, 支雁飞. 地下管道瞬态瑞雷波信号响应分析. *工程勘察*, 2015; **43**(6): 81–87
- 13 支雁飞, 张献民. 地下管道的瑞雷波动力学响应规律研究. *河北工业大学学报*, 2018; **47**(6): 100–106
- 14 Chen B, Lan J, Ge L, *et al.* Simulation research on acoustic detection technology of buried PE pipes. *Circuits Syst. Signal Process.*, 2021; **15**: 400–409
- 15 葛亮, 王甜, 肖小汀, 等. 基于时域叠加的声学埋地 PE 管道定位新方法. *天然气工业*, 2022; **42**(9): 111–121
- 16 Holmes C, Drinkwater B W, Wilcox P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation. *NDT & E Int.*, 2005; **38**(8): 701–711
- 17 冒秋琴, 陈尧, 张柏源, 等. 相位环形统计矢量对提高全聚焦成像质量的影响. *声学学报*, 2020; **45**(6): 913–921
- 18 黄文大, 李衍. 全矩阵捕获和全聚焦法相控阵成像检测技术. *无损检测*, 2021; **43**(11): 72–78
- 19 陈思静, 胡祥云, 彭荣华. 城市地下管线探测研究进展与发展趋势. *地球物理学进展*, 2021; **36**(3): 1236–1247
- 20 尹成, 田继东. 弹性波动力学简明教程. 北京: 石油工业出版社, 2014
- 21 李胜强, 刘振东, 严加永, 等. 高分辨深反射地震探测采集处理关键技术综述. *地球物理学进展*, 2020; **35**(4): 1400–1409
- 22 王驰, 刘志刚, 李醒飞, 等. 声-地震耦合探雷技术分析. *声学学报*, 2008; **33**(4): 354–359
- 23 张碧星. 半无界分层介质表面任意面源激发的弹性波场. *声学学报*, 2007; **32**(3): 193–204
- 24 Sugimoto T, Saitou H, Okujima M. Study of underground imaging using shear waves: the stacking method of the reflected scattered wave. *Archaeol. Prospect.*, 2000; **7**(4): 249–261