

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412673

不规则充液管柱模型中几何参数与流体声速反演*

石少鹏, 王 华, 李胜亚, 方志龙, 吴文河
(电子科技大学资源与环境学院 成都 611731)

摘要:充液管柱受管内外介质和环境的影响,会发生变形、腐蚀等问题,需要使用特定仪器进行定期检查以确保系统安全和可靠运行。实际测量环境复杂,管柱变形、仪器重力、居中器不当使用、管内流体性质变化等多重因素影响,使得测量仪器难以在理想的工作状态,从而降低检测精度。本文以套管井超声波测井为例来阐述以上问题,并结合超声波测量仪器的特点,设计了一套迭代优化算法。该算法能够在不规则充液管柱中,利用超声波测量到时定位仪器偏心测量轨迹、计算管柱内部流体声速、反演不规则管柱内边界。模拟和实测数据表明,本文提出的方法能够很好地预测仪器偏心轨迹,准确反演管柱内的流体声速并确定不规则管柱的几何参数(形状和位置)。该方法可以进一步提升套管井超声波测井仪器的使用性能,为后续进行管柱外的水泥评价提供可靠的约束。

关键词:充液管柱;超声波测量;偏心轨迹;不规则管柱;流体声速

中图分类号: TH762 TB52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Inversion of geometric parameters and ultrasonic wave velocity in an irregularly liquid-filled pipe model

Shi Shaopeng, Wang Hua, Li Shengya, Fang Zhilong, Wu Wenhe

(School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Fluid-filled pipes are susceptible to deformation and corrosion due to the influence of the media inside and outside the pipe as well as environmental conditions. To ensure system safety and reliable operation, it is necessary to conduct regular inspections using specialized instruments. The practical measurement environment is complex, affected by factors such as pipe deformation, instrument gravity, improper use of centralizers, and variations in the properties of the internal fluid, all of which can hinder the measurement instruments from functioning ideally and reduce the precision of inspections. This paper focuses on ultrasonic logging within fluid-filled casings as a case study to address these challenges. Leveraging the characteristics of ultrasonic logging tools, we have developed an iterative optimization algorithm. This innovative algorithm allows for the ultrasonic measurements to accurately locate the eccentric trajectory of the inspection tool within an irregular fluid-filled pipe, calculate the ultrasonic wave velocity in the pipe's internal fluid, and infer the internal boundaries of an irregular pipe. Both synthetic data and field data indicate that the proposed method can effectively evaluate the instrument's measurement state, precisely determine the ultrasonic wave velocity in the internal fluid, and ascertain the geometric parameters (such as shape and position) of irregular pipes. This approach significantly improves the usability of ultrasonic logging tools in fluid-filled casings, providing reliable data for further assessments, such as external cement evaluation in the context of well casings.

Keywords: fluid-filled pipe; ultrasonic logging; eccentric trajectory; irregular pipe; ultrasonic wave velocity in fluid

0 引 言

充液管柱(如油井套管、油气管道、给排水管道、化工

管道等)作为一种工业装置被用于各类液体的运输,在多个行业中发挥着关键作用。受到管内流体特性、管外环境条件、安装和管柱老化等因素的影响,充液管柱会发生变形、腐蚀和磨损等问题,危害生产安全。因此,需要对

收稿日期:2024-03-31 Received Date: 2024-03-31

* 基金项目:国家自然科学基金项目(41974150,42174158,42474167)、四川省科技计划项目(2023ZYD0157)资助

不规则充液管柱,特别是极端环境(如地下、海底、高温高压环境等)中的不规则充液管柱定期检测,以确保系统安全和可靠运行。但实际测量环境复杂,管柱变形、仪器自重、居中器的不当使用、管内流体性质变化等多重因素影响,使得测量仪器难以在理想状态工作,从而降低检测精度。本文以套管井中超声波测井为例,来阐述上述问题,探究不规则充液管柱模型中几何参数(形状和位置)与流体声速反演方法。

超声波测量是充液管柱尤其是油井套管完整性检测中常用的方法。通过在套管内部放入超声波测井仪器,激发高频声波,检测套管内壁的反射波形,分析套管的变形、腐蚀和缺陷等问题^[1]。在实际测量过程中,使用扶正器来保证仪器居中测量,但是扶正器的不当使用、大斜度井或水平井中仪器自重的影响、以及套管的不规则变形等因素会改变仪器的测量位置^[2],造成仪器在偏心状态下测量,进而影响仪器接收波形的到时和幅度^[3-5]。另外,随温度、压力等变化的流体声速,也会对测量波形造成影响^[6-7],降低充液管柱完整性评价效果。改善充液管柱内超声波测量评价效果的前提是获取仪器准确的测量位置和环境,包括仪器偏心位置、充液管柱的几何参数以及管柱内的流体声速。

针对套管井中超声波测量仪器测量位置和环境反演,大量学者展开了相关研究。Frisch等^[1]采用最小二乘法对超声测井仪器偏心位置定位,并反演了油井套管内边界。他们使用的超声测量仪器包含2个传感器,其中一个传感器面向于固定目标板,通过测量目标板反射波到时来实时反演管柱内部流体声速;另一个传感器面向管柱内壁,进行超声脉冲回波测量,根据反射波到时确定仪器偏心位置和套管内边界。但是他们假定仪器在固定位置完成旋转测量,且套管内边界为规则形状(椭圆)。Wang等^[8]通过分析方位接收波形的相位信息提出了一种仪器偏心定位算法,但分辨率仍有待提高。Zeroug等^[9]基于单个脉冲回波探头,利用拓展卡尔曼滤波方法反演了仪器偏心轨迹和管柱内部流体声速,但是他们假设套管尺寸已知,并且反演结果依赖给定的仪器运动模型。Forest-Bize等^[10]针对结合多个超声脉冲回波探头的随钻测井仪器设计了仪器偏心轨迹、井筒不规则内边界、井眼内流体声速反演的方法。该超声随钻仪器在周向均匀布设了4个超声换能器,激发面与井筒内壁平行。算法根据不同换能器到仪器中心的距离差异,用最小二乘方法反演流体声速,同时根据各个方位测量的反射波到时,用最大似然方法反演不规则井筒内边界和仪器偏心位置。该算法在仪器偏心情况下有效反演了不规则管柱内边界,但是算法需要借助多个脉冲回波探头,与油井套管超声波测量仪器存在明显差别,且得到流体声速并不准确。

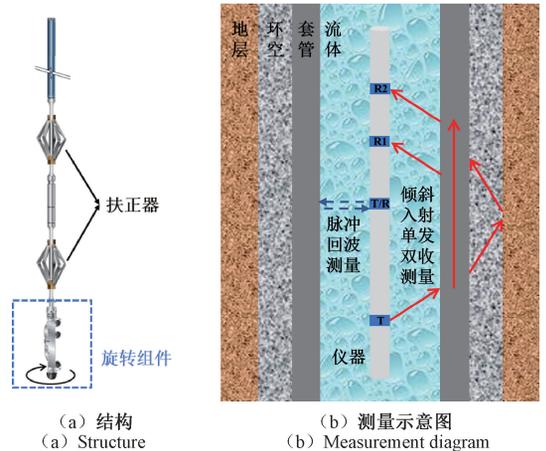
目前最先进的油井套管超声波测量仪器包含两种测量模式^[11]:一种测量方式是脉冲回波测量,垂直套管内壁发射超声波脉冲,测量来自套管的反射波和共振波(图1(b)中虚线箭头);另外一种测量方式是倾斜入射单发-双收测量,利用一组倾斜对齐的超声波探头,激发套管的挠曲模式(图1(b)中实线箭头),可以获取套管外部的界面信息。该超声波测量仪器通常被用于评价套管外水泥的固井质量^[12-14],但是针对该测井仪器进行偏心定位及套管内边界反演的算法研究较少且存在一定不足^[9],未充分发挥该超声测井仪器的优势。

基于上述油井套管中超声波测量仪器的特点,本文设计了迭代优化算法,能够结合两组超声波测量方式,充分利用接收波形中的到时信息,进行仪器偏心计算、套管内边界反演和管柱内部流体声速的计算。该算法能够进一步提升套管井超声波测井仪器的使用性能,有效评估不规则充液管柱内部的几何参数(形状和位置)与流体声速,同时能够服务后续的套管固井质量评价,校正仪器偏心、套管变形、流体声速变化造成的波形幅度和相位的变化,提高测量精度,为井筒完整性评价做出贡献。

1 油井套管中的超声波测量原理

1.1 脉冲回波测量原理

超声波测井仪器的结构如图1所示,其包含2种测量方式:脉冲回波测量(图1(b)中虚线箭头)和倾斜入射单发-双收测量(图1(b)中实线箭头)。2种测量方式分别位于仪器两侧,在测量过程中,随着仪器螺旋上升,同时进行数据的记录。将2种测量方式近似为同一深度的测量,则可以根据记录的反射波到时进行仪器在套管内的定位。如图1(c)所示,脉冲回波测量采用一个自发自收的超声波探头,垂直于套管内壁发射250 kHz左右的超声波,测量来自套管内外壁的反射波形,其中幅度最大的为来自套管内壁的反射波。



(a) 结构
(a) Structure

(b) 测量示意图
(b) Measurement diagram

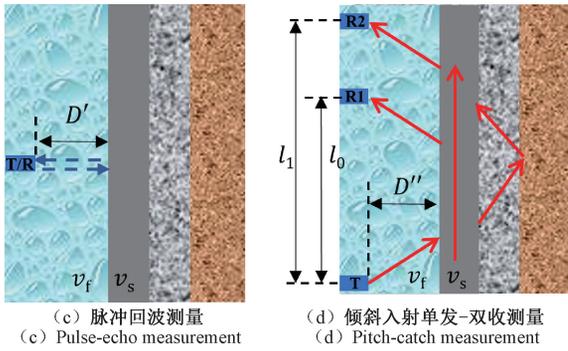


图1 超声测井仪器示意图

Fig. 1 Ultrasonic logging tool schematic

假设套管内流体声速为 v_f , 传感器发射端到套管内壁的距离为 D' , 则来自套管内壁的反射回波传播时间 t_v 可表示为:

$$t_v = 2D'/v_f \quad (1)$$

1.2 倾斜入射单发-双收测量原理

如图 1(d) 所示, 倾斜入射单发-双收测量包含 1 个发射换能器和两个接收换能器, 通过选取一定的入射角, 在套管中激发零阶反对称兰姆波 (A_0)。 A_0 模式在套管中传播, 同时会泄漏到套管两侧的介质中, 被 2 个接收器检测到。

根据射线理论, 近接收器检测到 A_0 首波的时间 t_N 和远接收器检测到 A_0 首波的时间 t_F 可表示为:

$$t_N = \frac{l_0}{v_s} + 2D'' \sqrt{\frac{1}{v_f^2} - \frac{1}{v_s^2}} \quad (2)$$

$$t_F = \frac{l_1}{v_s} + 2D'' \sqrt{\frac{1}{v_f^2} - \frac{1}{v_s^2}} \quad (3)$$

式中: l_0 表示发射器和近接收器之间的距离; l_1 表示发射器和远接收器之间的距离; v_s 表示套管中 A_0 挠曲波在套管中的传播速度; D'' 表示斜入射传感器到套管内壁的距离。

结合式 (2) 和 (3), 可以首先计算出套管中 A_0 挠曲波的传播速度 v_s 为

$$v_s = \frac{l_1 - l_0}{t_F - t_N} \quad (4)$$

2 充液管柱几何参数和流体声速反演算法

2.1 模式波到时提取

以油井套管中超声波测井仪器为例, 进行充液管柱几何参数和流体声速反演算法的介绍, 具体的算法流程如图 2 所示。

从脉冲回波测量波形中提取套管内壁反射波到时以及从斜入射测量 2 个接收器的波形中提取 A_0 首波到时

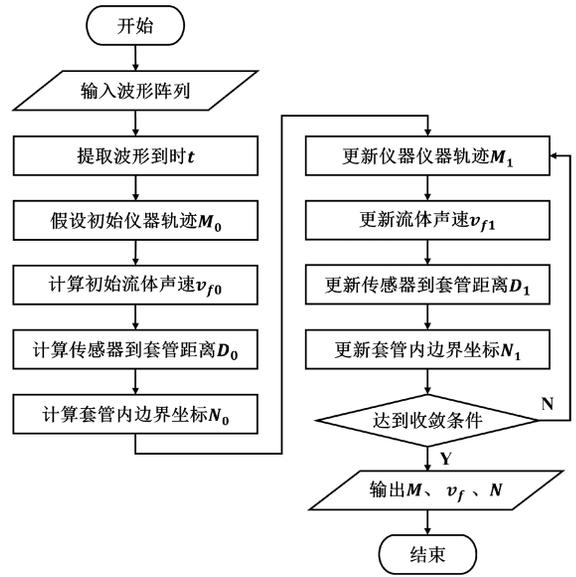


图2 迭代优化算法流程

Fig. 2 The iterative optimization algorithm workflow

是仪器定位算法的第 1 步。长短时窗算法 (STA/LTA)^[15-17] 是地震事件检测中广泛使用的算法, 也曾用于检测超声斜入射测量中 A_0 首波到时^[18]。本文利用 STA/LTA 算法提取脉冲回波到时和 A_0 首波到时。

2.2 测量模型正演

为了说明及验证后续算法流程, 基于脉冲回波测量以及倾斜入射单发-双收测量的测量原理, 利用数值模拟的方法模拟了超声波测井仪器在规则充液管柱 (椭圆边界) 内进行偏心测量的过程, 如图 3(a) 所示, 其中椭圆实线为套管内边界, 实心散点为仪器中心运动轨迹, 实心三角形模拟脉冲回波探头, 空心三角形模拟倾斜入射单发-双收探头, 仪器中心运动轨迹与探头 (三角形) 之间的连线长度表示传感器尺寸, 连线与坐标轴正方向的夹角表示传感器测量角度 (φ), “x”形散点为 36 次脉冲回波测量的传感器 (传感器 1) 位置, 圆形空心散点为 36 次倾斜入射单发-双收测量传感器 (传感器 2) 位置。根据正演模型计算了脉冲回波到时和 A_0 首波到时, 如图 3(b) 所示, 其中, 实心散点为测量的脉冲回波到时, 空心散点为近接收器 A_0 首波到时, 十字散点为远接收器 A_0 首波到时。

在建模过程中, 我们以套管内边界的中心点为坐标原点, 以脉冲回波测量的第 1 次测量方向为 x 轴正方向建立二维直角坐标系, 如图 3(a) 所示。套管内边界设置为椭圆, 椭圆长轴长为 0.1 m, 短轴长为 0.08 m, 椭圆边界绕坐标原点逆时针旋转 30° , 仪器中心运动轨迹设置为圆形, 圆心横坐标为 0.01 m, 圆心纵坐标为 0.02 m, 圆半径为 0.01 m。脉冲回波测量仪器尺寸 (即仪器中心到传

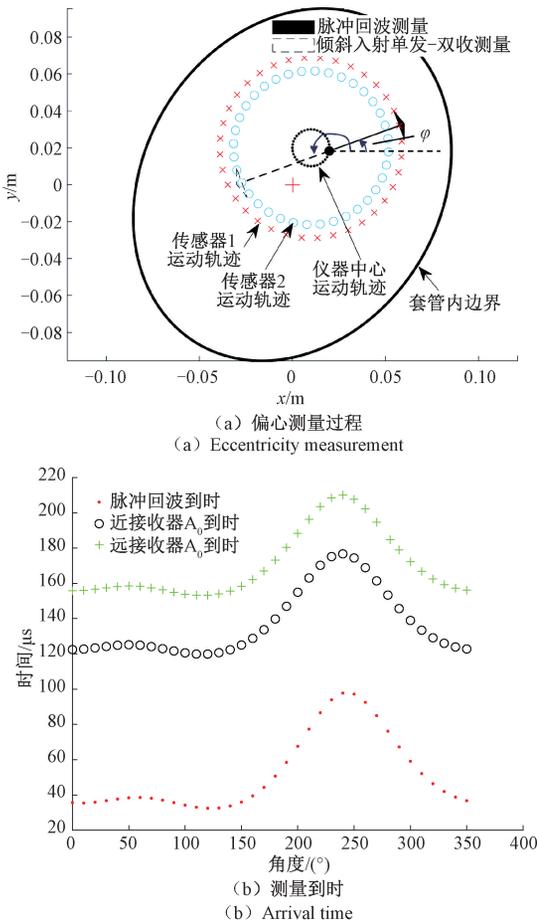


图 3 仪器偏心测量正演模型

Fig. 3 Forward model of tool eccentricity measurement

传感器发射端距离)设置为 0.04 m,倾斜入射单发-双收测量仪器尺寸设置为 0.05 m。仪器初始位置坐标为 (0.02 m, 0.02 m),在测量过程中,仪器沿运动轨迹逆时针旋转,同时仪器自身进行逆时针旋转测量,每次旋转角度为 10°,即旋转 1 周进行 36 次测量。脉冲回波测量初始测量角度为 0°,倾斜入射单发-双收测量初始测量角度为 180°。套管内流体声速设置为 1 500 m/s,套管中 A₀ 挠曲波的传播速度设置为 3 000 m/s。

根据正演的仪器运动过程,可以计算得到脉冲回波测量传感器发射端到套管内边界距离以及倾斜入射单发-双收测量传感器发射端到套管内边界距离,结合式(1)~(3),可以计算得到脉冲回波到时及远/近接收器 A₀ 首波到时。

2.3 估计初始流体声速

在实际测井过程中,随着测量深度的变化,套管内流体的温度、压强、组成成分等会发生变化,流体中超声波的传播速度也会发生变化。流体声速是充液管柱中超声波测井仪器定位的一个重要影响因素,需要在反演过程

中进行流体声速的估计。

在反演过程中,我们能够获取的信息包括套管尺寸、传感器尺寸、测量方位和不同模式波到时,需要反演的内容包括流体声速、仪器轨迹和套管内边界。

假设仪器初始运动轨迹(M_0)为坐标原点,即仪器固定在坐标原点进行旋转测量。在这一假设下,脉冲回波的测量距离与传感器尺寸之和等于同一测量方向上倾斜入射单发双收的测量距离与对应传感器尺寸之和,即:

$$D'(\varphi) + m_0 = D''(\varphi) + m_1 \quad (5)$$

式中: φ 表示传感器测量角度; $D'(\varphi)$ 表示在 φ 测量角度下的脉冲回波的测量距离; m_0 表示脉冲回波传感器尺寸; $D''(\varphi)$ 表示在 φ 测量角度下倾斜入射单发-双收的测量距离; m_1 表示倾斜入射单发-双收传感器的尺寸。将式(1)和(2)代入式(5)可得:

$$At_N - B = t_V \quad (6)$$

其中,

$$A = \frac{v_s}{\sqrt{v_s^2 - v_f^2}} \quad (7)$$

$$B = \frac{l_0}{\sqrt{v_s^2 - v_f^2}} + \frac{2(m_0 - m_1)}{v_f} \quad (8)$$

将 36 次测量到时代入式(6)可得非线性超定方程组,用最小二乘法求解该方程组可得初始流体声速的估计值 v_{j0} , 估计结果为 1 456.8 m/s。

2.4 估计套管内边界

将估计的流体声速 v_{j0} 代入式(1),可得脉冲回波传感器在任意测量方位 φ 到套管内边界的距离 $D'_0(\varphi)$;将估计的流体声速 v_{j0} 代入式(2)可得倾斜入射单发-双收测量传感器在任意测量方位 φ 到套管内边界的距离 $D''_0(\varphi)$ 。

对于脉冲回波测量,在测量角度 φ ,仪器的中心坐标为 $M_0(\varphi)$,则套管内边界在该方位的坐标 $N'_0(\varphi)$ 可表示为:

$$N'_0(\varphi) = M_0(\varphi) + \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} (m_0 + D'_0(\varphi)) \quad (9)$$

同理,对于倾斜入射单发-双收测量,本文可以由 M_0, m_1 和 $D''_0(\varphi)$ 估计套管内边界点集 N''_0 。

将套管内边界点集 N'_0 和 N''_0 转换到极坐标系中,如图 4(a) 所示,其中空心圆形散点为脉冲回波测量预测边界极坐标点集,十字散点为斜入射挠曲波测量预测边界极坐标点集。利用插值方法将 2 个点集的极角统一,取 2 个点集极径的均值作为估计的套管内边界极径(图 4(a) 实心圆点)。将套管内边界极坐标点集转换为直角坐标点集,得到估计的套管内边界 N_0 ,如图 4(b) 所示,其中外围散点为首次预测的套管内边界,外围实线为真实的套管内边界位置。

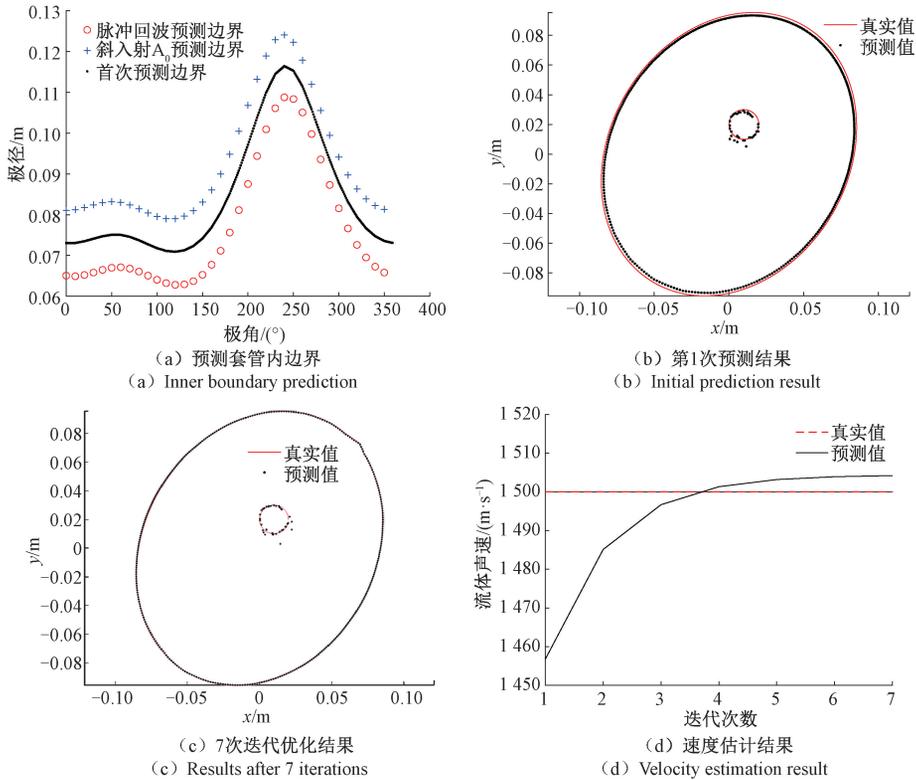


图4 反演结果

Fig. 4 Inversion results

2.5 更新仪器运动轨迹

在任意测量角度 φ , 从套管内边界 N_0 出发难以直接估计仪器中心所在位置 $M(\varphi)$ 。因此, 本文以上一次迭代估计仪器运动轨迹 (或初始给定仪器运动轨迹) 为起点, 采用局部搜索的方式, 进行仪器运动轨迹的下降搜索。

对于测量角度 φ , 上一时刻仪器的坐标为 $M_0(\varphi)$, 给定搜索窗口大小为 λ , 搜索步长为 δ , 计算搜索窗口内所有网格点作为仪器中心位置时, 估计的套管内边界与 N_0 的误差。对于任一网格点 $M'_0(\varphi)$, 误差计算公式为

$$err = dis(N'(\varphi), N_0) + dis(N''(\varphi + \pi), N_0) \quad (10)$$

其中, $N'(\varphi)$ 是脉冲回波测量从 $M'_0(\varphi)$ 出发, 在测量角度 φ 处估计的套管内边界位置, 采用式 (9) 进行计算。 $N''(\varphi + \pi)$ 表示倾斜入射单发 - 双收测量从 $M'_0(\varphi)$ 出发, 在测量角度 φ 处估计的套管内边界位置。 $dis(N'(\varphi), N_0)$ 表示点 $N'(\varphi)$ 到内边界 N_0 的最小距离, $dis(N''(\varphi + \pi), N_0)$ 表示点 $N''(\varphi + \pi)$ 到内边界 N_0 的最小距离。

选取误差最小的网格点作为当前窗口内的最优估计位置。从当前最优估计位置出发, 重新绘制窗口大小为 λ , 搜索步长为 δ 的网格, 计算下一个最优估计位置, 直到仪器位置不发生变化为止。将最终位置作为仪器在测量角

度 φ 处的估计位置, 依次计算 36 个测量角度的仪器位置坐标, 获取完整的仪器运动轨迹 M_1 。

将搜索窗口大小 λ 设置为 5×10^{-3} m, 搜索步长设置为 5×10^{-4} m, 首次反演的仪器运动轨迹如图 4(b) 所示, 其中内部散点为更新的仪器运动轨迹点, 内部实线为真实的仪器运动轨迹。

2.6 更新流体声速

2.3 节中的方法只能用于初始流体声速的估计, 当仪器轨迹发生变化时 (不在坐标原点), 脉冲回波测量距离 $D'_1(\varphi)$ 和倾斜入射单发 - 双收测量距离 $D''_1(\varphi)$ 不再相等, 需要采用新的方式在迭代优化过程中进行流体声速的估计。

利用估计的套管内边界 N_0 和仪器运动轨迹 M_1 , 可以计算传感器到套管内边界的距离, 根据 Forest-Bize 等^[10] 的思想, 借助式 (1) ~ (3), 可以用最小二乘方法更新流体声速。但是由于套管内边界和仪器运动轨迹都是估计值, 流体声速的更新存在较大的不确定性, 在迭代过程中收敛性较差, 如图 5 中实线 (带圆形标记) 所示。

考虑到实际测井中套管内边界周长基本不变, 且根据测量井段, 可以获取当前测量井段的套管尺寸 (套管外径和厚度), 因此, 添加套管内边界周长的约束, 根据预测的套管内边界周长进行流体声速的更新:

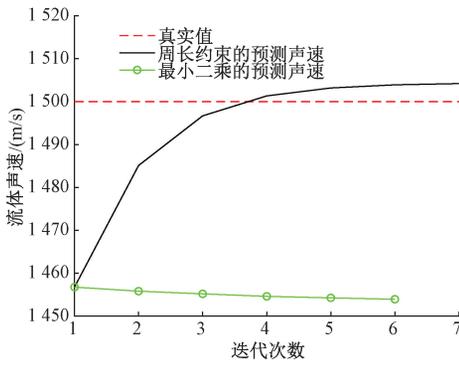


图 5 流体声速结果

Fig. 5 Estimation of the ultrasonic wave speed result

$$v_{\rho 1} = \frac{c_0}{c_{true}} \times v_{\rho 0} \quad (11)$$

式中: c_0 为边界 N_0 的周长; c_{true} 为根据套管尺寸计算得到的套管内边界周长; $v_{\rho 0}$ 为更新前的流体声速; $v_{\rho 1}$ 为更新后的流体声速。依据新的流体声速计算策略, 在迭代过程中流体声速的变化曲线如图 5 中实线所示, 随迭代次数的增加逐步向真实值收敛。

2.7 迭代收敛

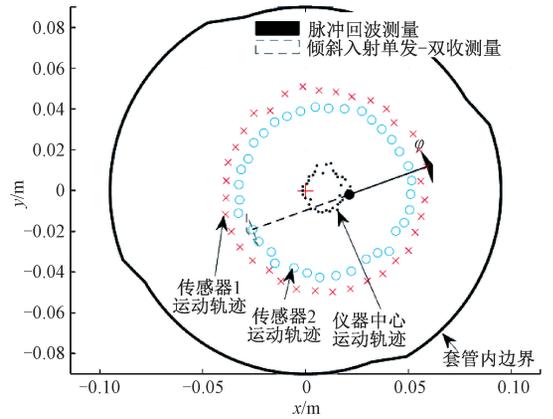
依据 2.4~2.6 节中的更新策略, 迭代优化套管内边界、仪器运动轨迹和流体声速, 直到仪器运动轨迹收敛为止, 即 2 次迭代步中, 仪器运动轨迹的坐标变化曼哈顿距离之和小于给定阈值 ρ 。当 ρ 为 10^{-3} m 时, 迭代进行了 7 次后停止, 最终反演结果如图 4(c) 所示, 估计的套管内边界与正演模型基本吻合, 均方根误差为 2.735×10^{-4} , 仪器运动轨迹与正演模型基本吻合, 均方根误差为 4.3×10^{-3} 。流体声速的更新曲线如图 4(d) 所示, 最终流体声速的估计值为 1503.7 m/s, 与正演模型中 1500 m/s 的流体声速相对误差为 0.25%。

3 实验验证及应用

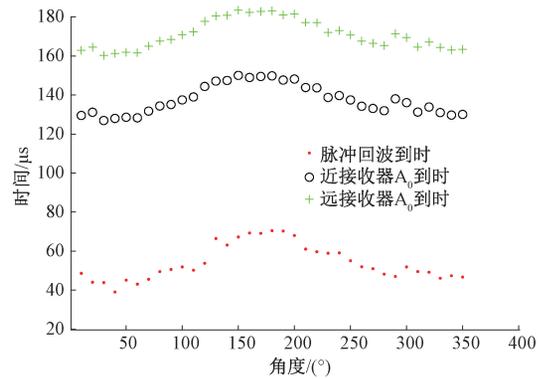
3.1 模拟数据验证

在图 4 中, 本文在规则充液管柱模型(椭圆边界)内反演了仪器偏心运动轨迹(圆形)和流体声速, 取得了较为理想的反演效果。为了进一步说明该迭代优化算法的有效性和适用性, 本文正演了在不规则充液管柱内超声波测井仪器按照不规则的仪器运动轨迹进行测量的过程, 如图 6(a) 所示, 套管内边界用外围实线表示, 仪器中心运动轨迹用内部散点表示, 给定流体声速为 1600 m/s, 套管中 A_0 模式波的传播速度为 3000 m/s。脉冲回波到时和斜入射 A_0 首波到时如图 6(b) 所示。

基于脉冲回波到时、远/近接收器 A_0 首波到时, 利用本文提出的迭代优化算法, 反演得到了仪器运动轨迹、套



(a) 仪器测量过程
(a) Tool measurement process



(b) 测量到时
(b) Arrival time

图 6 不规则边界内的正演模型

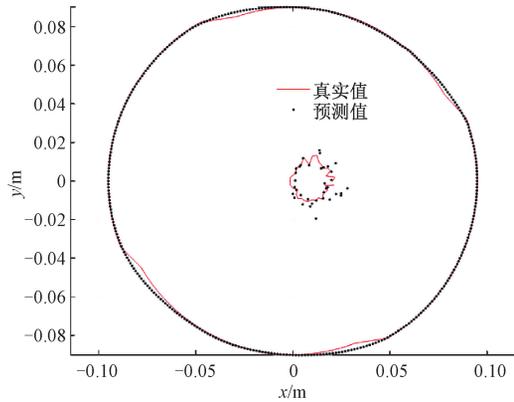
Fig. 6 Forward model within irregular boundaries

管内边界和套管内流体声速, 最终反演结果如图 7 所示。套管内边界的反演结果与正演模型基本吻合, 在突变处仍然存在偏差, 这是由于仪器测量的周向分辨率不足导致的, 最终预测套管内边界的与真实边界的均方根误差为 9.01×10^{-4} 。仪器为不规则运动, 预测结果与真实运动轨迹基本吻合, 最终预测的仪器运动轨迹与真实运动轨迹的均方根误差为 6.9×10^{-3} 。流体声速的估计受到套管内边界周长的约束收敛较为稳定, 最终预测的套管内流体声速为 1599.0 m/s, 与正演模型中给定的 1600 m/s 的流体声速相对误差为 0.06%。不规则边界内的仪器定位效果、套管内边界反演结果和流体声速估计结果有效证明了本文迭代优化算法的有效性和适用性。

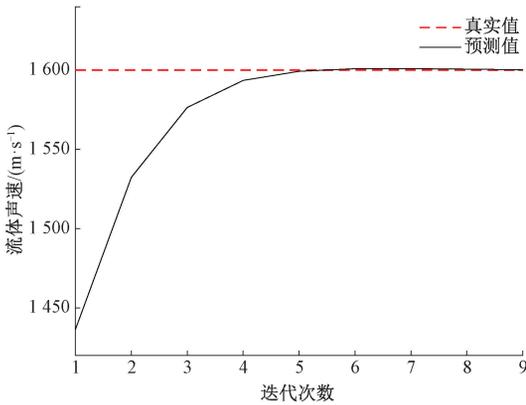
3.2 实验模型验证

为了验证不规则充液管柱几何参数和流体声速反演方法的正确性, 搭建了如图 8(a) 所示的测量系统。此测量系统采用 3 个步进电机分别控制超声波仪器的 X 轴运动、Y 轴运动和旋转运动, 利用上位机对 3 个电机进行控制。声源采用 250 kHz 宽频带超声波换能器, 换能器长度为 25 mm。使用函数发生器产生 250 kHz 正弦激励信

30 mm, 仪器初始测量方向为 X 轴正方向, 沿运动轨迹进行逆时针旋转移, 同时仪器自身每次旋转 10°。



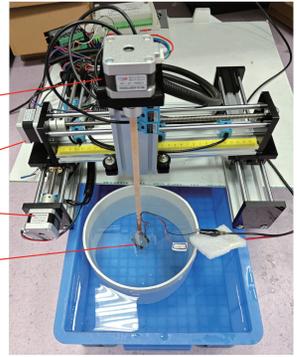
(a) 反演结果
(a) Inversion result



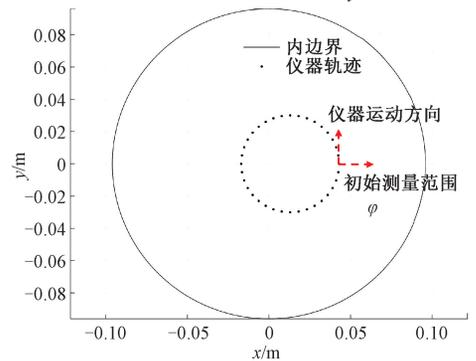
(b) 速度估计结果
(b) Velocity estimation result

图 7 不规则边界内的反演结果

Fig. 7 Inversion result within irregular boundaries



(a) 超声测量系统
(a) Ultrasonic measurement system



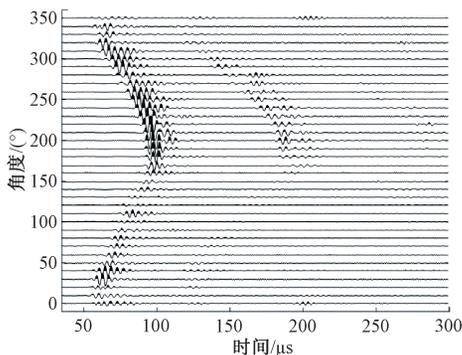
(b) 实验模型
(b) Experimental model

图 8 实验装置及设计

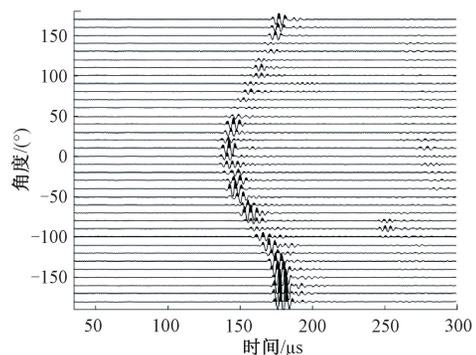
Fig. 8 Experimental setup and design

号, 使用虚拟数字示波器接收波形信号。套管采用 0.2 m 外径的 PVC 管进行模拟, PVC 管厚度为 4 mm。由于实验室中缺少倾斜入射单发-双收测量仪器, 使用脉冲回波测量代替倾斜入射单发-双收测量, 即在每个测量位置测量 φ 角度的脉冲回波波形数据和 $\varphi - 180^\circ$ 角度的脉冲回波波形数据。实验模型设置如图 8(b) 所示, 实线为内边界, 内边界半径为 96 mm, 圆心为坐标原点, 仪器轨迹为圆形, 圆心坐标为 (13 mm, 0 mm), 圆半径为

在 φ 方位进行脉冲回波测量得到的波形如图 9(a) 所示, 在同一位置的 $\varphi - 180^\circ$ 方位进行脉冲回波测量得到的波形如图 9(b) 所示。利用 STA/LTA 算法提取脉冲回波到时, 其中短窗长设置为 10 μs , 长窗长设置为 50 μs , 到时提取结果如图 9(c)、(d) 中圆圈所示, 可以看到到时提取结果与脉冲回波起跳点基本吻合, 将两组到时数据整理到 $[0, 360^\circ)$ 的角度范围内, 如图 9(e) 所示, 即可利用本文提出的迭代优化算法进行仪器定位、套管内边界反演和流体声速估计。



(a) φ 方位波形阵列
(a) Waveforms at φ



(b) $\varphi - 180^\circ$ 方位波形阵列
(b) Waveforms at $\varphi - 180^\circ$

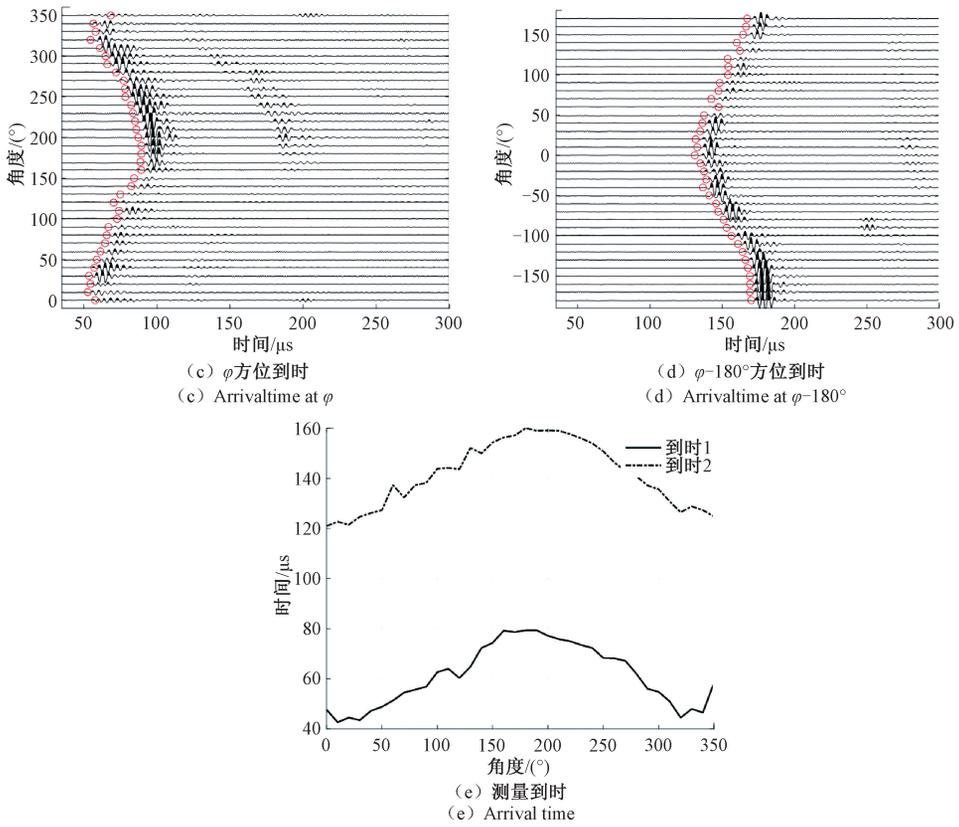


图 9 不规则边界内的反演结果

Fig. 9 Inversion result within irregular boundaries

为了获取真实的流体声速,将 2 个 250 kHz 超声波探头放置在水槽两端,进行一发一收测量,如图 10(a) 所示,2 个探头发射端间距 21.5 cm。接收波形如图 10(b) 所示,从波形中提取到时为 145.3 μs ,可以计算得到超声波在流体中的传播速度为 1 479.7 m/s。

由于采用脉冲回波测量代替倾斜入射单发双收测量,在计算初始流体声速阶段直接给定初始流体声速为 1 500 m/s,后续算法流程中计算传感器到套管内壁距离时全部采用脉冲回波测量距离计算公式。利用两组到时进行迭代优化反演,迭代 11 次后达到终止条件,最终的内边界和仪器运动轨迹反演结果如图 11 所示,与实验模型基本吻合。

内边界的预测结果与真实值的均方根误差为 1.7×10^{-3} ,仪器运动轨迹预测结果与真实值的均方根

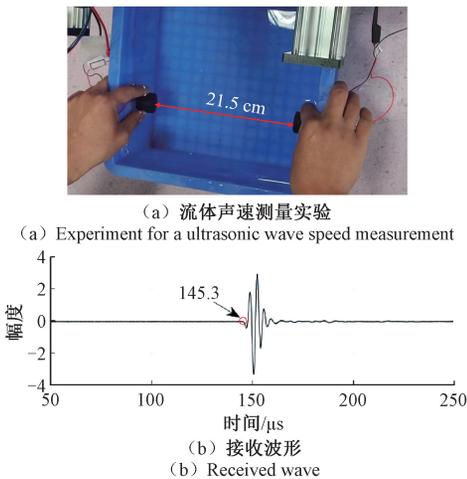
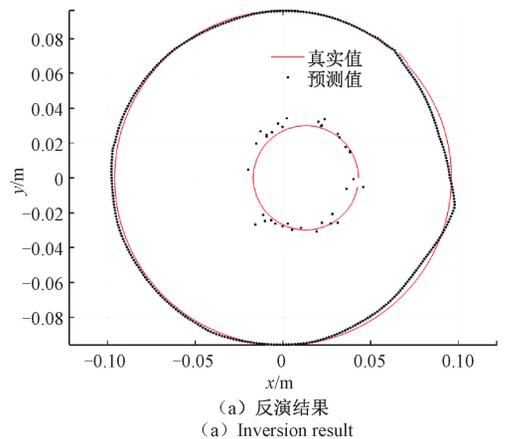


图 10 流体声速测量实验及测量结果

Fig. 10 Experiment and result for ultrasonic wave speed measurement



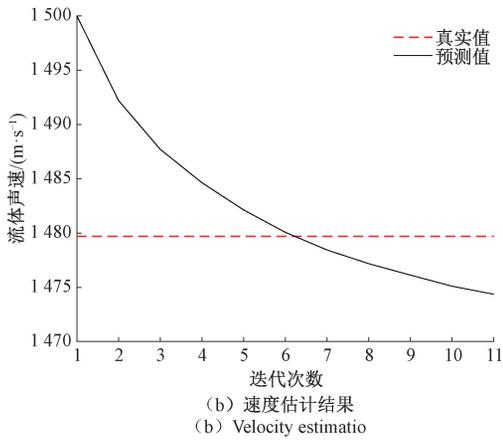


图 11 实验模型验证结果

Fig. 11 Experimental model verification results

误差为 1.19×10^{-2} 。流体声速的估计结果如图 11(b) 所示,最终预测流体声速为 1474.4 m/s,与实验测量流体声速 1479.7 m/s 的相对误差为 0.36%。

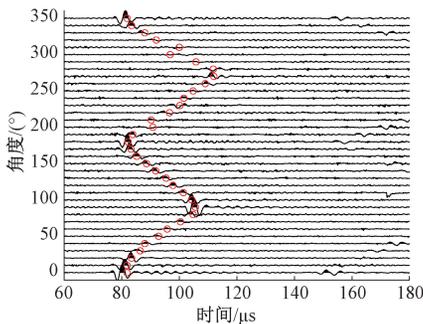
在上述模型的基础上,进行了两组重复实验,实验结果如表 1 所示,重复实验结果与真实实验模型基本吻合,充分验证了算法的稳定性。

表 1 重复实验结果

Table 1 Duplicate experimental results

	轨迹预测 均方根误差	内边界预测 均方根误差	流体声速预测 相对误差/%
第 1 次实验	0.011 9	0.001 7	0.36
第 2 次实验	0.012 6	0.001 5	0.37
第 3 次实验	0.012 5	0.001 1	0.26

为了进一步验证算法在不同模型中的有效性,在图 12 所示的变形套管中进行了旋转测量实验,仪器的运动轨迹保持在套管中心。仪器运动轨迹、套管内边界反演结果如图 13 所示,其中,图 13(a) 为 φ 方位波形阵列波形,圆圈为 STA/LTA 算法提取到的套管反射波到时;图 13(b)

(a) φ 方位波形阵列
(a) Waveforms at φ

为 $\varphi - 180^\circ$ 方位波形阵列,圆圈表示 STA/LTA 算法提取到的套管反射波到时;图 13(c) 为反演结果,其中实线为真实值,圆点为预测结果,仪器运动轨迹和套管内边界的预测结果与真实值均吻合较好,轨迹估计的均方根误差为 0.024,内边界的均方根误差为 0.002;图 13(d) 中实线为流体声速估计结果随迭代次数变化曲线,虚线为测量真实的流体声速,最终流体声速估计结果为 1467.16 m/s,与真实值的相对误差为 0.85%。预测结果与真实值基本吻合,进一步验证了算法的稳定性和有效性。



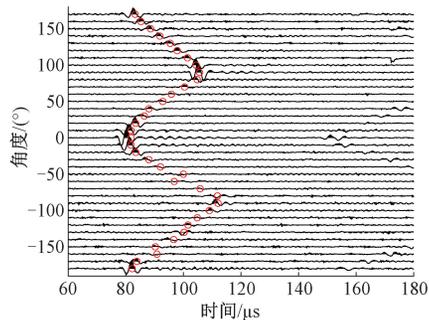
图 12 变形套管

Fig. 12 Deformed casing

3.3 实测数据应用

图 14 为某实验井中超声波测量仪器旋转一周接收到的脉冲回波数据和倾斜入射单发-双收实验数据。图 14(a) 为脉冲回波测量波形,其周向分辨率为 5° ,一周共 72 道波形。图 14(b) 和 (c) 分别为倾斜入射单发-双收测量近接收器和远接收器波形,其周向分辨率为 10° ,一周共 36 道波形。利用 STA/LTA 算法进行波形到时的提取,算法中短窗长设置为 $10 \mu\text{s}$,长窗长设置为 $50 \mu\text{s}$,图 14(a) ~ (c) 中实线为到时提取结果,拾取脉冲回波到时与 A_0 首波到时和模式波起跳点基本吻合,最后将到时汇总在图 14(d) 中。

根据拾取的到时进行仪器定位、套管内边界反演和流体声速估计,反演结果如图 15 所示。图 15(a) 为边界及仪器轨迹反演结果,其中虚线表示仪器中心运动轨迹,箭头为仪器运动方向。从反演结果中可以看出套管内边界基本为圆形,与建井套管尺寸基本相同。仪器偏心情

(b) $\varphi - 180^\circ$ 方位波形阵列
(b) Waveforms at $\varphi - 180^\circ$

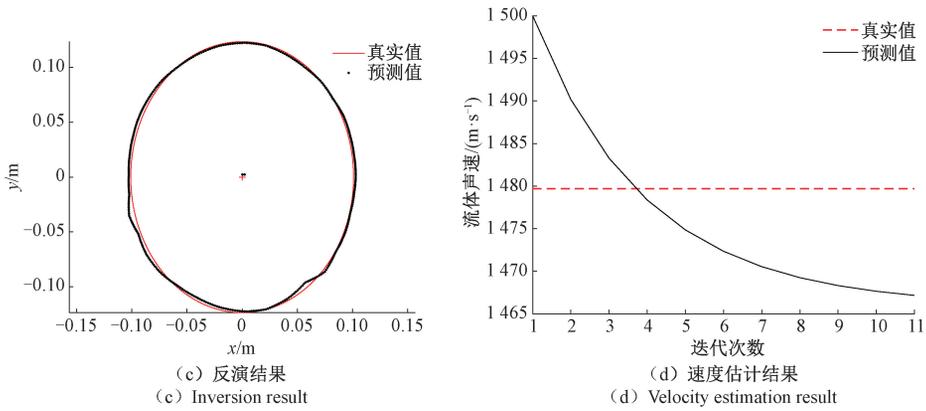
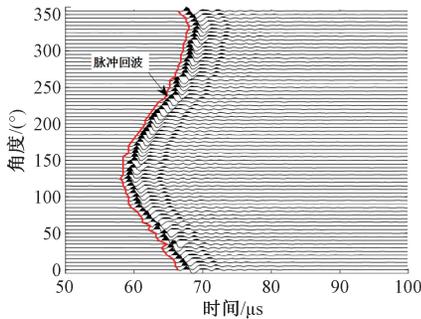
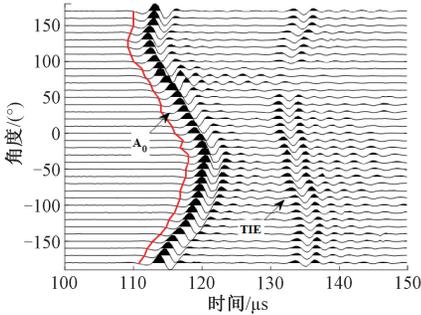


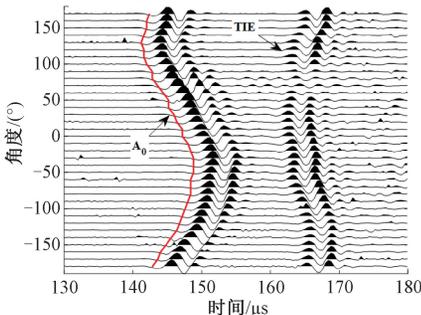
图 13 变形套管中实验结果
Fig. 13 Results in deformed casing



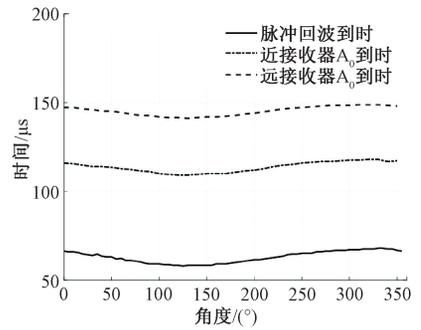
(a) 脉冲回波测量波形
(a) Waveforms for a pulse-echo measurement



(b) 斜入射测量近接收器波形
(b) Waveforms for pitch-catch measurement at a near receiver



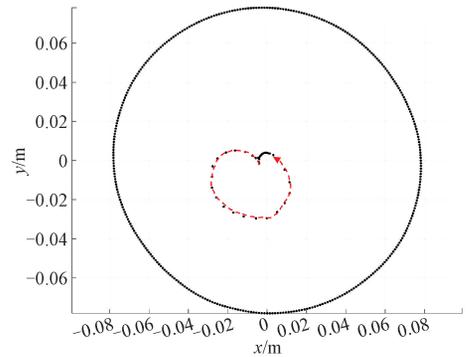
(c) 斜入射测量远接收器波形
(c) Waveforms for pitch-catch measurement at a far receiver



(d) 到时提取结果
(d) Arrival time extraction results

图 14 实测数据 I 波形阵列及到时提取结果
Fig. 14 Waveforms of field data I and arrival time extraction results

况较为严重,与测量过程中未使用居中器有关。图 15(b)为流体声速反演结果,最终流体声速预测结果为 1 579.7 m/s,与建井时套管内填充水存在一定偏差,但考虑到水中可能混杂泥沙,因此,最终声速预测结果在可接受的范围内。



(a) 边界及仪器轨迹反演结果
(a) Inversion result for boundary and tool trajectory

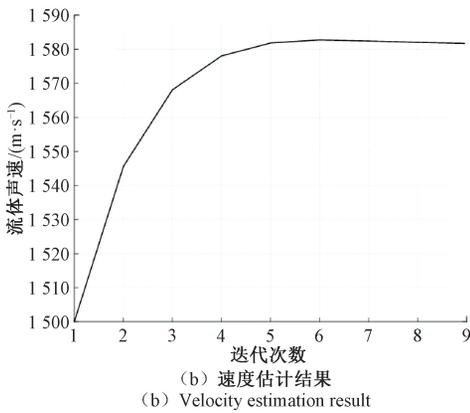
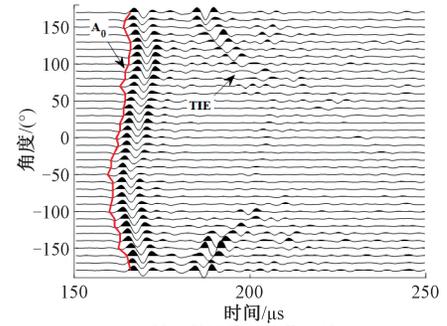


图 15 实测数据 I 反演结果

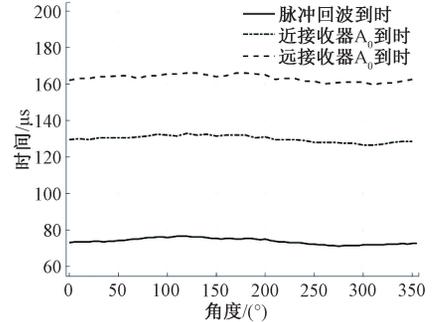
Fig. 15 Inversion result for field data I

图 16 为一口 9.625 in 实测井中超声波测量仪器旋转一周接收到的脉冲回波数据和倾斜入射单发-双收数据,相较于第 1 个实测案例,测量更为规范。脉冲回波测量的周向分辨率为 5°,一周共 72 道波形,如图 16(a) 所示。倾斜入射单发-双收测量的周向分辨率为 10°,一周共 36 道波形,其中图 16(b) 为近接收器波形、图 16(c) 为远接收器波形。利用 STA/LTA 算法进行波形到时的提取,提取结果在波形阵列上用实线表示,最终汇总在图 16(d) 中。

根据拾取的到时进行仪器定位、套管内边界反演和流体声速估计,反演结果如图 17 所示。从反演结果中可以看出,套管内边界为标准的圆形,表明套管未发生变



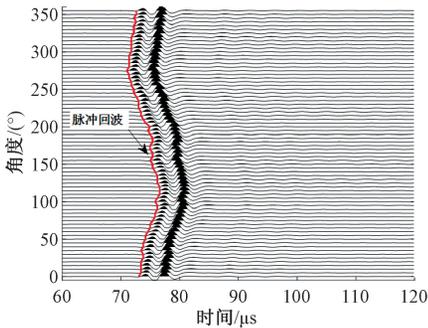
(c) Waveforms for pitch-catch measurement at a far receiver



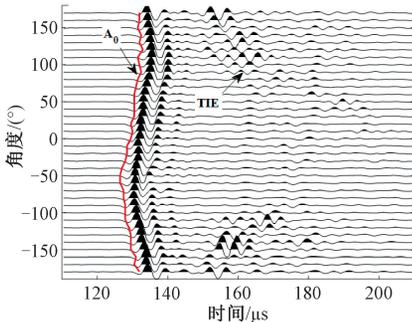
(d) Arrival time extraction results

图 16 实测数据 II 波形阵列及到时提取结果

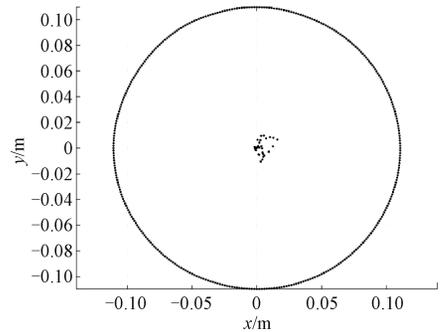
Fig. 16 Waveforms of field data II and arrival time extraction results



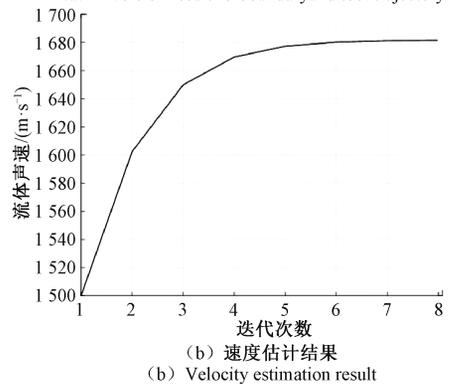
(a) Waveforms for a pulse-echo measurement



(b) Waveforms for pitch-catch measurement at a near receiver



(a) Inversion result for boundary and tool trajectory



(b) Velocity estimation result

图 17 实测数据 II 反演结果

Fig. 17 Inversion result for field data II

形,且尺寸与建井模型基本相同。由于测量过程更为规范(使用居中器保持居中测量),仪器中心基本保持在套管中心附近。最终流体声速预测结果为 1 681.6 m/s,略大于水中声速,推测与井下温度、压力改变有关。最终的预测结果验证了测量过程的规范性,为后续进行套管完整性评价以及套管外水泥评价提供了可靠的建议。

3.4 讨论

与目前存在的超声测井仪器定位算法相比,本文提出的方法有一定的优势。首先,本文提出的方法能够结合 2 种不同的超声测量方式或 2 种相同的超声测量方式进行不规则充液管柱中仪器偏心运动的定位,改进了目前一些学者利用单个脉冲回波探头只能进行规则管柱模型中仪器偏心定位的现状;其次,本文提出的方法能够进行不规则充液管柱几何参数反演和管柱内流体声速的计算,不需要添加边界形状的约束且不需要利用额外的超声探头进行流体声速的测量,提高了套管井超声波测井仪器的使用性能;最后,本文提出的方法在流体声速更新过程中添加了套管井内边界周长的约束,改进了流体声速的迭代优化策略,相较 Forest-Bize 的方法,获得了更好的流体声速估计结果。

当然,本文提出的方法也存在一些不足。如轨迹和内边界的反演效果受到到时提取精度的影响,需要开发更加精确的到时提取算法来保障轨迹和内边界的反演效果。另外目前的处理是针对单一深度的充液管柱几何参数和流体声速进行反演,尚未进行全部深度的充液管柱几何参数反演和流体声速计算,下一步的实验将考虑临近测量深度的相似性,进行仪器运动轨迹、充液管柱几何参数、流体声速的整体评估。随着测量长度的增加,数据规模不断增大,算法的计算效率也是需要重点考虑,可以采用并行计算的方式加速轨迹的反演和内边界的估计;同时可以将临近深度的估计结果作为下一深度的估计初始值,加速迭代过程;当然,也可以更新迭代算法,采用更加高效的迭代优化算法来加速轨迹的迭代更新,以满足生产过程中对时效性的要求。

4 结论

本文从一种结合脉冲回波测量和倾斜入射单发-双收测量的超声测井仪器出发,设计了一个迭代优化算法,能够进行不规则充液管柱(油井套管)几何参数和流体声速的反演工作,解决了由于套管变形、仪器偏心、流体声速变化等造成的测量不准确问题,提高了不规则充液管柱完整性评价的精度。模拟数据、实验测量数据以及油井实测数据中的充液管柱几何参数和流体声速的反演结果充分验证了算法的有效性和稳定性。

1)在模拟的规则充液管柱(椭圆)中进行仪器偏心

测量时,根据两种超声测量反射波到时反演的充液管柱几何参数与实际参数的均方根误差为 2.735×10^{-4} ,预测的仪器偏心运动轨迹与实际运动轨迹均方根误差为 0.004 3,预测流体声速与实际流体声速的相对误差为 0.25%。

2)在模拟的不规则充液管柱中进行仪器偏心测量中,根据 2 种超声波测量反射波到时反演的充液管柱几何参数与实际参数的均方根误差为 9.001×10^{-4} ,预测的仪器偏心运动轨迹与实际运动轨迹均方根误差为 0.006 9,预测流体声速与实际流体声速的相对误差为 0.06%。

3)在实验室搭建了一个三轴(X轴、Y轴和旋转轴)运动控制平台,控制超声波探头在充液管柱(PVC管)内按照指定运动轨迹进行脉冲回波测量,根据两组相背方向的超声脉冲回波测量数据,准确反演了 PVC 管的几何参数(均方根误差 0.001 7)、仪器运动轨迹(均方根误差 0.011 9)和流体声速(相对误差 0.36%)。

4)将本文方法应用到油田两口不同尺寸的实测井数据中,算法在仪器偏心测量情况下,计算出了仪器中心运动轨迹,并准确反演出了充液管柱(油井套管)的几何参数和管柱内流体的声速。

本文方法可以进一步提升套管井超声波测井仪器的使用性能,为后续改善不规则充液管柱完整性评价效果,以及进行管柱外部环境评价提供了可靠的约束。

参考文献

- [1] FRISCH G J, MANDAL B. Advanced ultrasonic scanning tool and evaluation methods improve and standardize casing inspection [C]. Transactions of the SPWLA (Society of Professional Well Log Analysts) 42nd Annual Logging Symposium, 2001:1-14.
- [2] 刘东明,周超,王亚东,等. 声波变密度测井偏心影响校正及其应用[J]. 测井技术, 2023, 47(5):623-628.
LIU D M, ZHOU CH, WANG Y D, et al. Eccentricity correction of acoustic variable density logging and its application [J]. Well Logging Technology, 2023, 47(5):623-628.
- [3] 张秀梅,林伟军,王秀明,等. 套管井中偏心对声场的影响分析[J]. 应用声学, 2014, 33(1):1-8.
ZHANG X M, LIN W J, WANG X M, et al. Effects of eccentricity on acoustic wave propagation in cased boreholes [J]. Journal of Applied Acoustics, 2014, 33(1):1-8.
- [4] KAYAMA K, MIKADA H, TAKEKAWA J, et al. Influence of eccentricity/tilted sonic logging tool on dispersive wave [C]. SEG International Exposition and Annual Meeting, 2021.

- [5] 刘露梅. 基于高性能计算的复杂井筒声场特征研究[D]. 成都:电子科技大学, 2022.
LIU L M. Research on the characteristics of complex wellbore acoustic fields based on high-performance computing [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [6] WANG ZH J, NUR A, BATZLE M L. Acoustic velocities in petroleum oils [J]. Journal of Petroleum Technology, 1990, 42(2): 192-200.
- [7] LIANG F CH, LI Y X, LI Q G, et al. Experimental study on the ultrasonic echo characteristics of oil-water emulsion [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2022, 135: 110640.
- [8] WANG H, TAO G, ZHANG K. Wavefield simulation and analysis with the finite-element method for acoustic logging while drilling in horizontal and deviated wells [J]. Geophysics, 2013, 78(6): D525-D543.
- [9] ZEROUG S, BOSE S, SINHA B, et al. Sonic and ultrasonic measurement applications for cased oil wells [J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2016, 58(8): 423-430.
- [10] FOREST-BIZE N, JARROT A, LEGENDRE E, et al. Bridging the gap between geologists and drillers: LWD ultrasonic imaging goes that extra mile [C]. SPWLA Annual Logging Symposium, 2022.
- [11] BELLABARBA M, BULTE-LOYER H, FROELICH B, et al. Ensuring zonal isolation beyond the life of the well [J]. Oilfield Review, 2008, 20(1): 18-31.
- [12] 杨耿骁, 王华. 同时反演泥浆与环空介质声阻抗的超声脉冲回波固井质量评价方法 [J]. 地球物理学报, 2023, 66(10): 4370-4385.
YANG G X, WANG H. An algorithm to simultaneously inverse the mud and cement acoustic impedances from the ultrasonic pulse-echo measurement in a cased-hole [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66 (10): 4370-4385.
- [13] GKORTSAS V M, BOSE S, ZEROUG S. Machine learning for the automated detection of diagnosis-revealing features on leaky flexural wave imager data [C]. 45th annual review of progress in quantitative nondestructive evaluation, 2019, 38: 050008.
- [14] OBANDO P G, GARDNER D, DELABROY L, et al. An evaluation of the cement sheath quality of casing

sections recovered during a well abandonment operation [C]. SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, 2020.

- [15] ALLEN R V. Automatic earthquake recognition and timing from single traces [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1978, 68 (5): 1521-1532.
- [16] TRNKOCZY A. Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm [M]. New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP), 2009: 1-20.
- [17] AKRAM J, EATON D W. A review and appraisal of arrival-time picking methods for downhole microseismic data [J]. Geophysics, 2016, 81(2): KS71-KS91.
- [18] SHI SH, WANG H, LI M, et al. Ultrasonic pitch-catch measurement wavefield analysis and casing reflection suppression [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 234: 212591.

作者简介



石少鹏, 2020 年于电子科技大学获得学士学位, 现为电子科技大学博士研究生, 主要研究方向为声学信号处理和固井质量评价。

E-mail: shaopengsh@163.com

Shi Shaopeng received his B. Sc. degree in 2020 from University of Electronic Science and Technology of China. Now he is a Ph. D. student in University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include acoustic signal processing and cement bond evaluation.



王华 (通信作者), 2005 年于中国石油大学 (华东) 获得学士学位, 2008 年于中国石油大学 (北京) 获得硕士学位, 2012 年于中国石油大学 (北京) 获得博士学位, 现为电子科技大学教授, 主要研究方向为井筒地球物理、信号与信息智能处理。

E-mail: huawang@uestc.edu.cn

Wang Hua (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2005 from China University of Petroleum (East China), received his M. Sc. degree in 2008 from China University of Petroleum (Beijing), received his Ph. D. degree in 2012 from China University of Petroleum (Beijing). Now he is a professor in University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include borehole geophysics, signal and information intelligent processing.