

引用格式:车阳,董京楠,陈春宇,等.基于声波远探测技术裸眼老井地下定位研究与验证[J].油气藏评价与开发,2025,15(6):1112-1120.

CHE Yang, DONG Jingnan, CHEN Chunyu, et al. Research and validation of underground positioning for open-hole old wells using acoustic remote detection technology[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(6): 1112-1120.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.06.018

基于声波远探测技术裸眼老井地下定位研究与验证

车阳^{1,2}, 董京楠³, 陈春宇⁴, 方明星⁵, 谭茂金⁶, 唐魏泓⁶

(1. 中国石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 2. 油气钻完井技术国家工程研究中心, 北京 102206;

3. 中国石油国家卓越工程师学院, 北京 100096; 4. 中国石油长庆油田公司, 陕西 西安 710000;

5. 中国石油塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000; 6. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:枯竭油气藏改建为储气库的过程中,识别并封堵复杂老井是至关重要的步骤。对于含有铁磁性管柱的老井,通常采用磁探测技术进行定位;而对于无铁磁性信标的裸眼老井,地下定位则依赖于欠精确的井史资料,易产生较大误差。声波远探测技术通过分析声波反射特征,可实现对井旁异常地质体的探测与识别,理论上具备对裸眼老井精确定位的能力。采用空间四阶时间二阶的时域交错网格有限差分法(FDTD)求解弹性波动方程,从声场特征、裸眼井反射成像特征、声波远探测数据处理与定位3个方面系统地分析了该技术在裸眼井探测和地下定位中的可行性。首先,采用空间四阶时间二阶的时域交错网格有限差分法求解弹性波动方程,模拟不同地质条件下声波在井旁传播的行为;随后,基于实际工况下的声波反射特征,结合数值模拟结果,分析了裸眼井反射成像特征;最后,通过对实测数据进行处理,验证了声波远探测技术在实际应用中的探测范围和精度。实验结果表明,声波远探测技术不受外界因素影响,能准确定位地下3 000 m深度的裸眼老井在地层中的空间位置,探测范围可达4~16 m,定位误差小于0.5 m,适用于复杂地质条件下的废弃井定位。研究表明,声波远探测技术不仅突破了传统定位方法的局限性,还显著提升了裸眼老井的定位精度,为枯竭油气藏改建天然气储库提供了关键技术支撑。该技术的应用不仅提高了废弃井安全封堵的效率,还降低了地下定位误差引发的风险。后续研究将进一步优化算法,拓展探测范围,提升地下定位精度,以满足更广泛的工程需求。

关键词:声波远探测;裸眼老井;数值模拟;磁探测技术;地下定位

中图分类号:TE281

文献标识码:A

Research and validation of underground positioning for open-hole old wells using acoustic remote detection technology

CHE Yang^{1,2}, DONG Jingnan³, CHEN Chunyu⁴, FANG Mingxing⁵, TAN Maojin⁶, TANG Weihong⁶

(1. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing 102206, China; 2. National Engineering Research Center for Oil & Gas Drilling and Completion Technology, Beijing 102206, China; 3. CNPC National Elite Institute of Engineering, Beijing 100096, China; 4. PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710000, China; 5. PetroChina Tarim Oilfield, Korla, Xinjiang 841000, China; 6. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In the process of converting depleted oil and gas reservoirs into gas storage facilities, identifying and sealing complex old wells is a crucial step. For old wells with ferromagnetic casings, magnetic detection technology is typically employed for localization. However, for open-hole old wells without ferromagnetic beacons, underground positioning relies on inaccurate historical well data, often leading to significant errors. Acoustic remote detection technology, which analyzes acoustic reflection characteristics, theoretically enables the precise positioning of open-hole old wells by detecting and identifying anomalous geological bodies near the borehole. This study systematically investigated the feasibility of this technology for detecting open-hole old wells and their underground positioning from three aspects: acoustic field characteristics, reflection imaging features of an open-hole old well, and data processing and localization for acoustic remote detection. First, a staggered-grid finite-difference time-domain (FDTD) scheme with fourth-order spatial and second-order temporal accuracy was employed to solve the elastic wave equation, simulating acoustic wave propagation around the borehole under various geological conditions. Subsequently, based on acoustic reflection characteristics under actual working conditions and combined with numerical simulation results, the reflection imaging features of the open-hole old well were analyzed. Finally, by processing field data, the detection range and accuracy of

收稿日期:2024-09-13。

第一作者简介:车阳(1993—),男,硕士,高级工程师,主要从事复杂井钻井和储气库封井技术研究工作。地址:北京市昌平区黄河街5号院1号楼A829,邮政编码:102206。E-mail: cheyangdri@cnpc.com.cn

基金项目:中国石油科技项目“井眼轨道智能导钻技术与仪器研发”(2023ZZ0602);中国石油科学研究与技术开发项目“裸眼井声波探测定位方法研究”(2021DQ03-05)。

the acoustic remote detection technology in practical applications were validated. Experimental results indicated that the acoustic remote detection technology was unaffected by external factors and could effectively determine the spatial position of open-hole old wells at depths up to 3 000 m. The detection range was 4 to 16 m, with a positioning error of less than 0.5 m, indicating its suitability for locating abandoned wells under complex geological conditions. This study demonstrates that acoustic remote detection technology not only overcomes the limitations of traditional positioning methods but also significantly improves the positioning accuracy of open-hole old wells, providing key technical support for the conversion of depleted oil and gas reservoirs into natural gas storage facilities. The application of this technology enhances the safety and efficiency of abandoned well sealing and reduces risks associated with positioning errors. Future research will focus on further optimizing the algorithm, expanding the detection range, and improving positioning accuracy to meet broader engineering requirements.

Keywords: acoustic remote detection; open-hole old well; numerical simulation; magnetic detection technology; underground positioning

在国家能源储备战略背景下,针对枯竭油气藏改建储气库的安全保障工作,裸眼老井的精准定位与封堵至关重要。随着裸眼老井数量日益增多,常规封堵面临挑战,需借助井旁新钻井对裸眼老井定位后实施封堵。常规井下探测方法获取井外信息的范围较小,只能在井口近端几米内进行探测^[1],对10 m以外老井的探测存在明显的局限性。声波远探测技术打破了这一局限性,可以对井外较远区域进行探测,具有抗干扰能力强、地下定位精度高和经济成本低的特点^[2],对低密度非金属套管定位具有极大的开发潜力^[3]。

目前,中国主要使用电磁和静磁2种探测定位系统^[4-5],电磁定位主要以Wellsport系列工具为代表,通过检测套管和落鱼上汇聚电流所产生的磁场来定位井眼,最大探测距离为60 m,方位精度在3°左右,但受钻井液导电性、井斜和地层电阻率影响显著^[6-7];静磁探测主要以PMR系统和Magtrac系统为代表,通过磁通门传感器检测套管和落鱼的剩余磁场来定位井眼,最大探测距离为15 m,方位精度为10°,受钻井液、井斜和地层电阻率的影响较小^[8-9]。采用磁探测技术的前提是井中有铁磁管柱,无法应用于裸眼老井。而声波远探测技术可以在不受地层、电磁等因素影响的条件下,解决电磁、静磁探测技术的应用限制。该技术分为反射纵波成像和反射横波成像,分别针对单极子和偶极子,偶极子声源的偏振特性自身具备方位指向性,偶极反射横波相比于单极纵波,对井外反射体中的流体更加灵敏,反射横波的信噪比更高,更易于提取^[10-11]。

利用数值模拟的方法分析裸眼井的成像特征,分析该技术探测范围和探测精度,提出一种裸眼老井地下定位方法,将其运用于储气库裸眼老井封堵作业中。结果表明,声波远探测技术作为一种新兴技术,对裸眼老井中特定的目的层段进行精确定位有着独特优势,是新一代井眼重入技术迭代升级的重要保障。

1 远探声波差分正演方法

1.1 方法原理

图1为裸眼井声波远探测原理示意图。该技术不仅

可以确定井旁反射体的空间位置,还可通过四分量数据旋转解析井旁反射体的方位角或走向。阵列声波远探测成像技术采用一对正交分布的偶极子作为声源,向地层定向辐射声波,通过偶极子声源与阵列接收器的组合排列,可有效分析成像结果方位,且因偶极声源频率较单极子声源低,使其可以探测更远的范围^[12-13]。

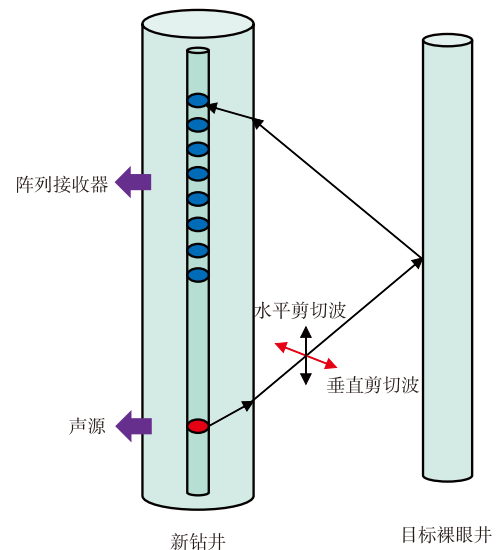


图1 裸眼井声波远探测原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle of acoustic remote detection in an open-hole old well

1.2 弹性波动方程

使用的三维时域有限差分方法,结合了非均匀交错网格的技术和完美匹配层(PML)吸收边界,有效降低了数值频散和波形失真程度。同时,该算法融合了多核并行计算机制,使得声场计算效率大幅度提高,特别是对于井旁存在声阻抗不连续面的非均质反射声场模拟来说,优势更加明显,该算法不仅可以对一般的分区均匀介质进行计算,且容易实现对横向各向同性介质和正交各向异性介质的数值模拟。采用空间四阶时间二阶的时域交错网格格式^[14-16],三维弹性波动方程可写为:

$$\begin{cases} D_t v_{i,j+1/2,k}^n = \frac{1}{\rho} \left(D_x \sigma_{xx_{i,j+1/2,k}}^n + D_y \sigma_{xy_{i,j+1/2,k}}^n + D_z \sigma_{xz_{i,j+1/2,k}}^n \right) \\ D_t v_{i+1/2,j,k}^n = \frac{1}{\rho} \left(D_x \sigma_{yx_{i+1/2,j,k}}^n + D_y \sigma_{yy_{i+1/2,j,k}}^n + D_z \sigma_{yz_{i+1/2,j,k}}^n \right) \\ D_t v_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}^n = \\ \frac{1}{\rho} \left(D_x \sigma_{zx_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}}^n + D_y \sigma_{zy_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}}^n + D_z \sigma_{zz_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}}^n \right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} D_t \sigma_{xx_{i+1/2,j+1/2,k}}^{n+1/2} = (\lambda + 2\mu) D_x v_{x_{i+1/2,j+1/2,k}}^{n+1/2} + \\ \lambda D_y v_{y_{i+1/2,j+1/2,k}}^{n+1/2} + \lambda D_z v_{z_{i+1/2,j+1/2,k}}^{n+1/2} \\ D_t \sigma_{yy_{i+1/2,j+1/2,k}}^{n+1/2} = \lambda D_x v_{x_{i+1/2,j+1/2,k}}^{n+1/2} + \\ (\lambda + 2\mu) D_y v_{y_{i+1/2,j+1/2,k}}^{n+1/2} + \lambda D_z v_{z_{i+1/2,j+1/2,k}}^{n+1/2} \\ D_t \sigma_{zz_{i+1/2,j+1/2,k}}^{n+1/2} = \lambda D_x v_{x_{i+1/2,j+1/2,k}}^{n+1/2} + \\ \lambda D_y v_{y_{i+1/2,j+1/2,k}}^{n+1/2} + (\lambda + 2\mu) D_z v_{z_{i+1/2,j+1/2,k}}^{n+1/2} \\ D_t \sigma_{yz_{i+1/2,j,k+1/2}}^{n+1/2} = \mu_{i+1/2,j,k+1/2} \left(D_y v_{z_{i+1/2,j,k+1/2}}^{n+1/2} + D_z v_{y_{i+1/2,j,k+1/2}}^{n+1/2} \right) \\ D_t \sigma_{xz_{i,j+1/2,k+1/2}}^{n+1/2} = \mu_{i,j+1/2,k+1/2} \left(D_x v_{z_{i,j+1/2,k+1/2}}^{n+1/2} + D_z v_{x_{i,j+1/2,k+1/2}}^{n+1/2} \right) \\ D_t \sigma_{xy_{i,j,k}}^{n+1/2} = \mu_{i,j,k} \left(D_x v_{y_{i,j,k}}^{n+1/2} + D_y v_{x_{i,j,k}}^{n+1/2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: D_t 为时间差分算子,表示物理量对时间 t 的离散导数,用于描述随时间变化的量; D_x 、 D_y 、 D_z 为空间差分算子; x 、 y 、 z 为空间方向的离散导数; v 为速度,表示质点在 x 、 y 、 z 3个方向上的速度分量,单位 m/s; σ 为应力张量分量,单位 Pa; ρ 为材料密度,单位 kg/m^3 ; λ 为第一拉梅常数; μ 为剪切模量(也称为第二拉梅常数); n 为当前时间步; i 、 j 、 k 分别为空间网格点的索引,分别对应 x 、 y 、 z 3个方向的离散位置。

1.3 边界条件

在实际运算中,直接对密度和拉梅系数采用附近网格点平均值,以保证在固体-液体界面处满足边界条件。

$$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} + \frac{1}{\mu_3} \quad (4)$$

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3}{3} \quad (5)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为邻近网格点的第一拉梅常数; μ_1 、 μ_2 、 μ_3 分别为邻近网格点的第二拉梅常数; ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 分别为邻近网格点的材料密度,单位 kg/m^3 。

采用完美匹配层吸收边界。在完美匹配层边界中,通过选择合适的衰减系数可有效削弱人为边界反射波。当 PML 模型被离散化之后,反射波衰减并不随衰减系数的增大而减小,反而在人工边界处产生次生反射。为了在数值模拟中最大限度的削弱人工边界处的反射波,同

时减小离散化造成的额外边界反射,通常情况下需要采用基于经验公式优化确定衰减系数分布/大小:

$$d_*(i) = d_0 \left(\frac{i}{n} \right)^p \quad (6)$$

式中: d_* 为 i 处对应的衰减系数; d_0 为初始衰减系数; i 为当前网格点在 PML 区域中的位置索引; n 为 PML 区域的厚度,表示从计算域到 PML 外边界的网格单元数目; p 为幂指数,用于控制衰减函数的增长趋势,选择合适的 p 可优化波动能量在 PML 内的吸收效率。

$$d_0 = \log \left(\frac{1}{R} \right) \frac{\tau v_s}{nh} \quad (7)$$

式中: R 为理想情况下的反射系数; τ 为波的传播时间尺度,单位 s; v_s 为介质中的剪切波速度(或波传播速度),单位 m/s; h 为网格步长,通常为计算区域的离散化间隔(单位长度),单位 m。

1.4 声源加载

声源的选取与加载对数值模拟影响效果较大,为保证数值模拟计算结果的精确性,采用高斯函数的二阶导数为偶极声源(图2)。偶极声源加载在速度节点^[17]。时间域中偶极声源能量可表示为:

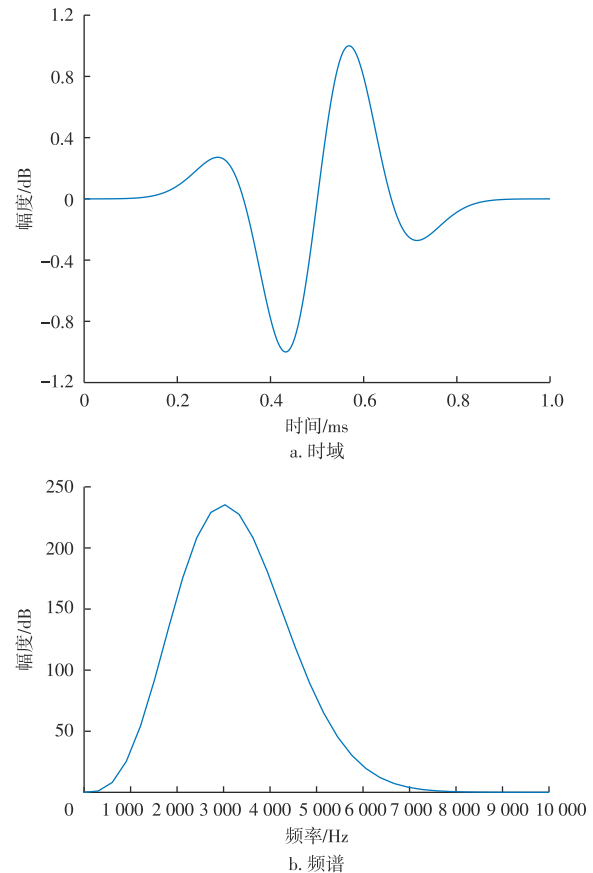


图2 偶极声源时域及其频谱

Fig. 2 Time domain and frequency spectrum of dipole acoustic source

$$f(t) = 4\zeta^2(3t - 2\zeta t^3)e^{-\zeta t^2} \quad (8)$$

式中: t 为时间,单位s; ζ 为频率相关系数,单位 Hz^2 ; f 为幅度,单位dB。

1.5 频散分析

在进行波场有限差分数值模拟中,网格的离散化会导致截断误差的产生,且随波场迭代递推不断累积。若差分阶数低或时空步长设置不当,误差将迅速累积,导致计算结果失真甚至发散,影响波场模拟分析。所以保证有限差分算法的精确度与可靠性的关键是满足算法的稳定性条件。空间四阶与时间二阶相结合能够在确保计算效率前提下提供更高数值精度。时间二阶离散化能够捕捉到时间上的变化,空间四阶离散化则能够更好地描述空间上的细节,进而在整体上提高模型的精度^[18-19]。

$$\Delta t \leq 1 / \left(v_p \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}} \right) \quad (9)$$

式中: Δx 、 Δy 、 Δz 为 x 、 y 、 z 方向的网格大小,单位m; Δt 为采样间隔,单位s; v_p 为纵波速度,单位m/s。

1.6 数值模拟验证

将有限差分的计算结果与实轴积分法的计算结果进行对比研究。在单极子模型中纵波,横波以及斯通利波的到时完全吻合,有限差分计算的横波幅度略低于实轴积分法计算的结果。在偶极子模型中,2种方法计算结果吻合。证明有限差分算法的正确性,可以开展不同模型的数值模拟与特征分析(图3)。

2 数值模拟规律

2.1 裸眼井模型设置

为了研究不同地层模型对声波远探测反射波的影响,设计了砂岩与泥岩2种地层类型的裸眼老井模型。对 $10.47 \text{ m} \times 5.00 \text{ m} \times 21.22 \text{ m}$ 的模型进行非均匀网格划分,沿 x 方向采用 0.15 m 网格,沿 y 方向采用 0.02 m 网格,沿 z 方向在井眼附近区域(约 0.5 m 范围内)采用 0.01 m 精细网格,其余区域采用 0.15 m 网格。最终模型网格数为 $500 \times 200 \times 1\,000$ 。仪器模型采用市场主流的声波成像仪(DSI),仪器的接收器间距为 $0.152\,4 \text{ m}$,源距为 3.525 m ,波形记录时长为 20 ms 。模拟声源采用高斯二阶导数,频率为 3 kHz ,声源偏振方向为 y 轴。砂岩地层、泥岩地层以及裸眼井内部填充物参数如表1所示。

2.2 地层对全波列信号的影响规律

当地层类型为软地层时(图4a、图4b),地层纵横波

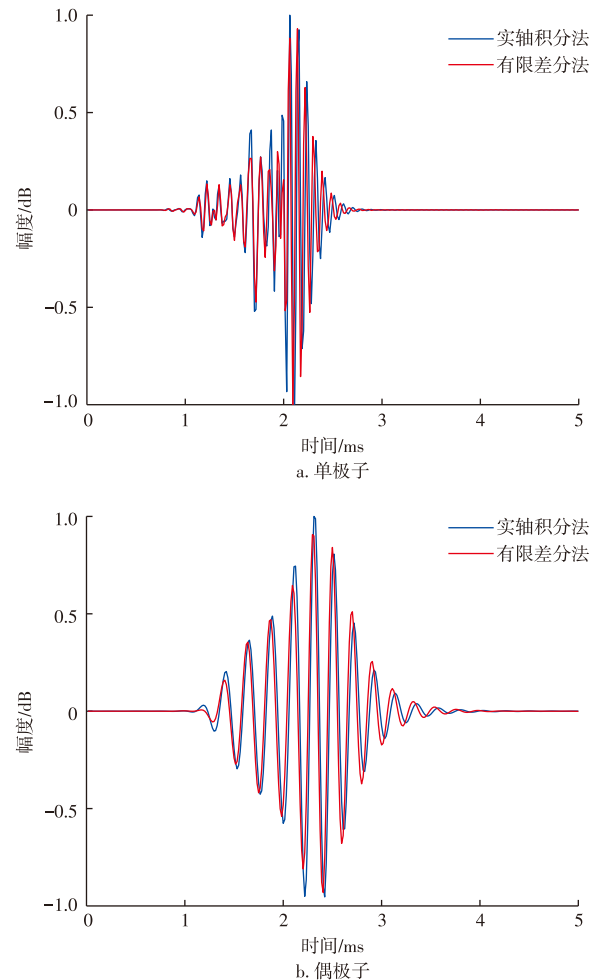


图3 单极子与偶极子实轴积分法与有限差分法对比

Fig. 3 Comparison between real-axis integration method and finite-difference time-domain method for monopole and dipole sources

表1 裸眼老井内部不同填充物参数

Table 1 Parameters of different filling materials inside open-hole old well

填充物	纵波速度/ (m/s)	横波速度/ (m/s)	密度/ (kg/m^3)
井孔流体	1 450		1 000
砂岩地层	3 500	1 850	2 600
泥岩地层	2 300	1 250	2 200
空段	340		1
松散泥土	1 200		880

速度与井孔流体的纵横波速度差异小,直达波形态发生变化,井孔调制作用减弱;当地层类型为硬地层时(图4c、图4d),地层纵横波速度与井孔流体的纵横波速度差异大,直达波有多个波峰波谷组合,井孔调制作用强。全波列中反射波幅度相较于背景地层为砂岩的反射波幅度大,更容易在全波列中识别出来。

2.3 填充物对反射波幅度的影响规律

如图5所示,当裸眼井中填充松散泥土和空段时,直

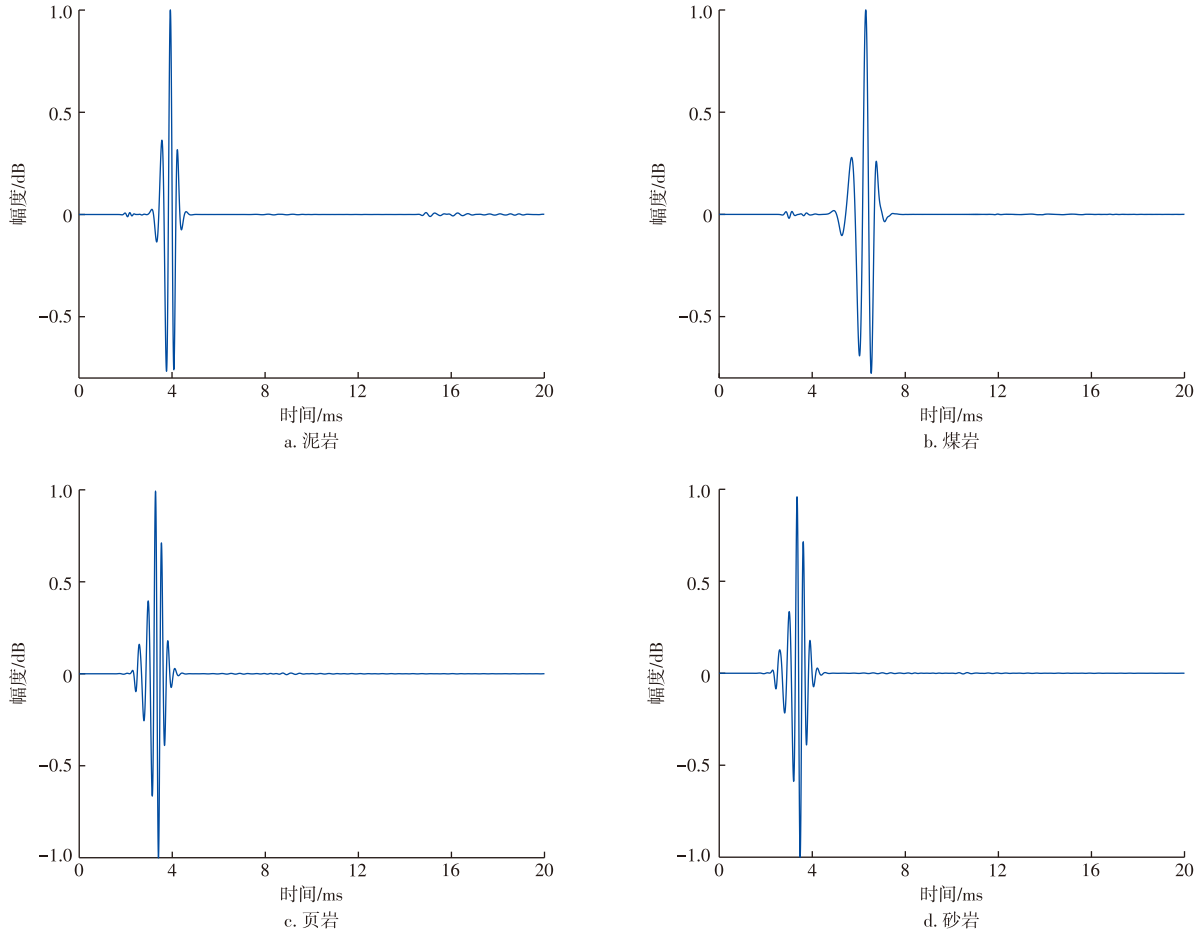


图4 不同地层的全波列信号

Fig. 4 Full wavetrain signals from different formations

达波形态、反射波幅度均没变化,表明当裸眼井内部充填松散泥土或空段时,对声波远探测全波列信号几乎无显著影响。

射波的幅度会随着目标井与新钻井之间的距离增加而降低。当目标井距离井眼小于4 m时,趋势与大于4 m的相反,说明反射波与直达波的重叠,提取的反射波存在误差,DSI仪器无法对4 m以内的目标井进行成像;当目标井与新钻井的距离超过16 m时,反射波幅度明显减小,DSI仪器在20 ms的测量时间内无法获取准确的反射体信号。

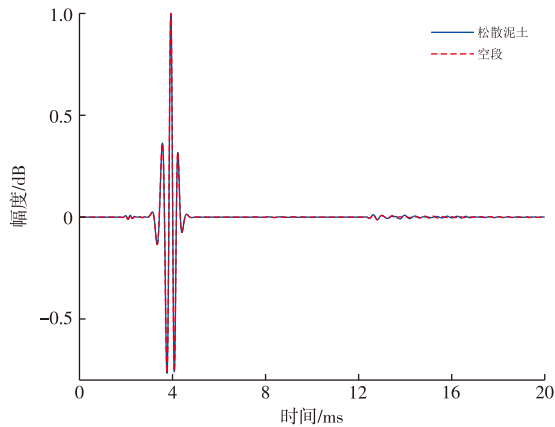


图5 裸眼井填充介质的全波列信号

Fig. 5 Full wavetrain signals from open-hole well filled with different media

2.4 距离对反射波幅度的影响规律

如图6所示,当裸眼中填充了松散泥土和空段时,反

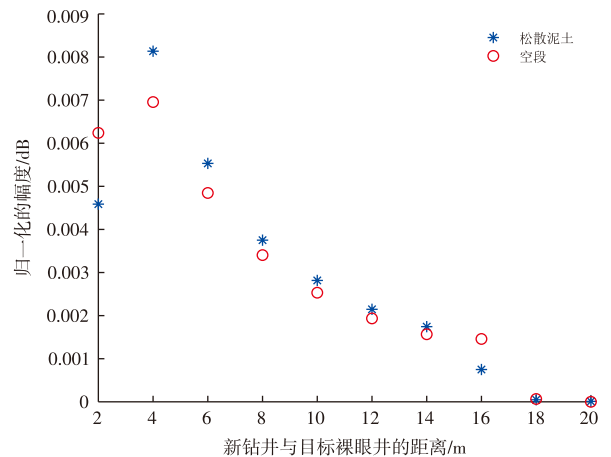


图6 不同距离裸眼井填充不同介质的反射波幅度定量分析

Fig. 6 Quantitative analysis of reflected wave amplitude for open-hole well filled with different media at various distances

2.5 声波远探测波场特征

波形图中包含全波列中不同模式波到时与幅度信息,无法解释幅度变化的原因,通过波场快照不仅可以清楚观测到不同模式波,也能从机理反映反射波幅度变化的根本原因。图7展示了 x 、 z 方向目标井与新钻井不同距离不同时刻的波场快照。当距离为4 m时, $t=2.46$ ms时,水平偏振剪切波(SH波)波前首次井壁接触,在界面

处产生反射波并引发波前干涉现象; $t=3.28$ ms时,SH波穿透目标井,大部分能量以透射波的形式向外传播,目标井内部存在井壁多次反射现象; $t=4.10$ ms时,目标井作为新的声源向外辐射SH波。当距离为10 m时, $t=2.46$ ms时,SH波波前呈圆形,新钻井内部有多次反射; $t=3.28$ ms时,SH波波前未与井壁接触; $t=4.10$ ms时,SH波波前仍未与井壁接触。对比说明,延长仪器测量时间才可接收到更远距离的反射波信号。

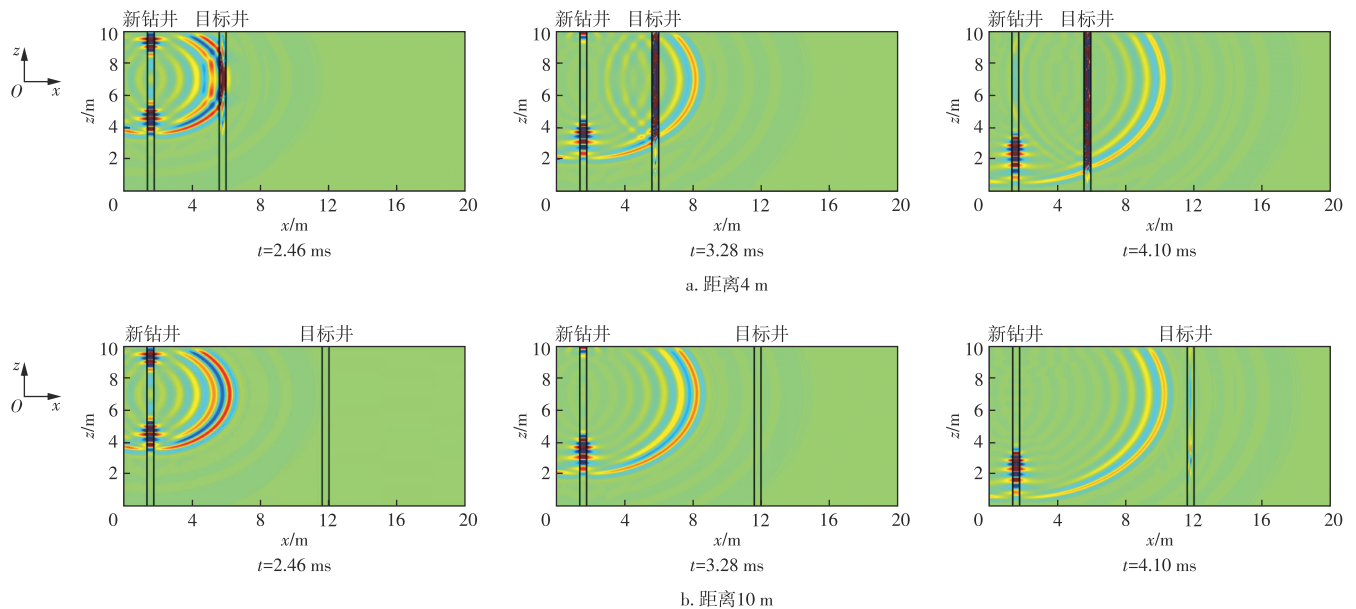


图7 新钻井与裸眼目标井不同距离和时刻的波场快照

Fig. 7 Wavefield snapshots of new well and target open-hole well at different distances and times

3 定位数据处理

声波远探测处理方法主要包括数据预处理,反射波提取和反射体成像3个部分。

为了实现偶极横波远探测对井旁构造的方位识别功能,首先需要将仪器坐标系下的数据转化为固定大地坐标系下的数据,再将固定大地坐标系下的四分量数据,利用下式可计算任意角度 φ 下的垂直和水平反射波剖面。

$$\begin{cases} \mu_{SH} = \mu_{xx} \cos^2 \varphi - (\mu_{xy} + \mu_{yx}) \sin \varphi \cos \varphi + \mu_{yy} \sin^2 \varphi \\ \mu_{SV} = \mu_{xx} \sin^2 \varphi + (\mu_{xy} + \mu_{yx}) \sin \varphi \cos \varphi + \mu_{yy} \cos^2 \varphi \end{cases} \quad (10)$$

式中: μ_{SH} 为水平反射剖面的振幅分量,单位dB; μ_{SV} 为垂直反射剖面的振幅分量,单位dB; μ_{xx} 、 μ_{yy} 分别为横波沿 x 、 y 方向振幅分量,单位dB; μ_{xy} 、 μ_{yx} 为横波在 xy 平面内的剪切分量,单位dB; φ 为观测点方位角,单位($^{\circ}$)。

在声波远探测测井过程中,接收器记录的全波信号包含井孔模式波、反射波、转换波等,相互叠加、干扰,导致有效的信号变得模糊,甚至可能被掩盖。因此,需对原

始波形进行反射波振幅的增强处理,主要包括压振处理与波幅补偿两部分。首先,压振处理采用奇异值分解法,波幅补偿对原始波形进行改造,对声波资料进行波场分离,从波场分离后的波形数据中提取共中心点组合,从而提高信噪比;其次,还需通过井壁成像测井来确定构造产状,选取合适的倾角范围及步长,结合阵列声波测井提取的偶极横波时差,进行动校正处理,基于动校正处理后的各道波形计算标准道和加权系数,完成共中心点组合叠加;最后,利用频率-波数域(f - k 域)波动方程偏移方法实现反射波归位,形成声波远探测剖面。具体数据处理流程见图8。

4 裸眼井地下定位反演方法

4.1 声波远探测成像数据重建

声波远探测成像数据重建就是将不同角度 x 、 z 方向的声波远探测剖面重建为三维声波远探测数据,研究了线性插值和凸集投影插值方法在声波远探测成像数据重建中的应用效果。线性插值是针对一维数据的插值方

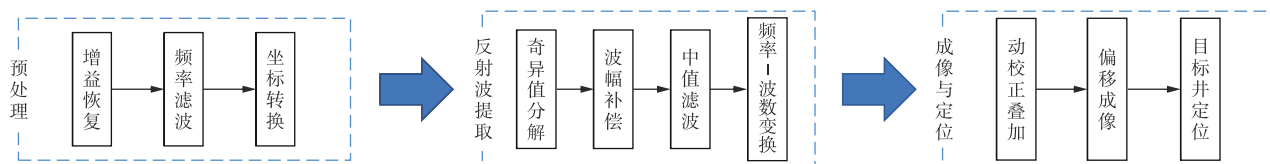


图8 声波远探测数据处理流程

Fig. 8 Data processing flow of acoustic remote detection

法,具体表达式如式(11)所示。

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (11)$$

式中: x_0 为第一个已知数据点的横坐标,单位m; y_0 为对应 x_0 的纵坐标,单位m; x_1 为第二个已知数据点的横坐标,单位m; y_1 为对应 x_1 的纵坐标,单位m; x 为需要进行插值计算的目标点的横坐标,单位m; y 为通过插值计算得出的目标点的纵坐标,单位m。

凸集投影插值算法是地震勘探中较为经典的算法,具体表达式如式(12)所示。

$$d_{\text{obs}} = \mathbf{M}d \quad (12)$$

式中: \mathbf{M} 为采样算子,是由1和0组成的对角矩阵; d_{obs} 为不同角度的声波远探测幅度,单位dB; d 为期望得到的完整幅度,单位dB。

在数据处理时,依照每隔 10° 提取反射剖面,利用线性插值和凸集投影插值的方法分别对数据进行插值计算与效果对比(图9)。不同插值算法结果对比表明: xOy 剖面上反射体集中分布于北西向;凸集投影插值法是针对空间域和频率域的算法,对声波远探测成像数据有滤波作用,但对于稀疏矩阵不具有较好的重建能力,无法实现 xOy 剖面的成像重建。

4.2 裸眼老井地下定位

4.2.1 角度计算

声波远探测的反射波是由多个波峰波谷组成的,但仅有最大峰值对应反射体的真实位置。因此,需要通过希尔伯特变换对反射波信号进行滤波,使其仅有1个峰值,才能反应裸眼老井的实际位置。

在数学上,希尔伯特变换被定义为原始信号 $B(t)$ 与 $1/(\pi t)$ 的卷积。用数学符号表示就是:

$$H[x(t)] = B(t)(1/\pi t) \quad (13)$$

式中: B 为原始信号,单位dB; H 为峰值信号,单位dB; π 为圆周率。

确定极大值的阈值后,沿深度方向与时间方向利用求导的方法对反射波信号进行求导,当2个方向处的导数均为0时,证明此处为极大值,再结合能量统计结果锁定极大值范围,连线即可得到老井角度 θ (图10)。

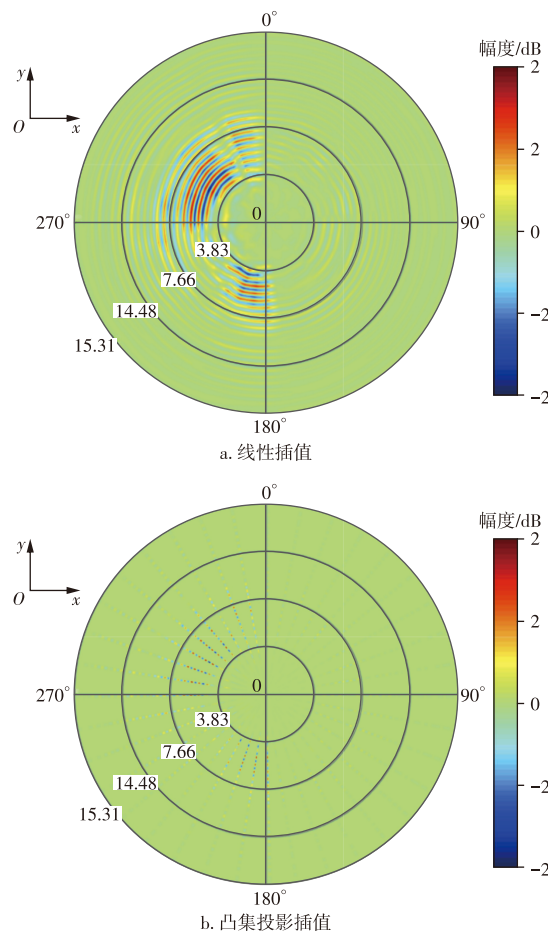


图9 线性插值与凸集投影插值结果对比

Fig. 9 Comparison of results between linear interpolation and projection onto convex sets

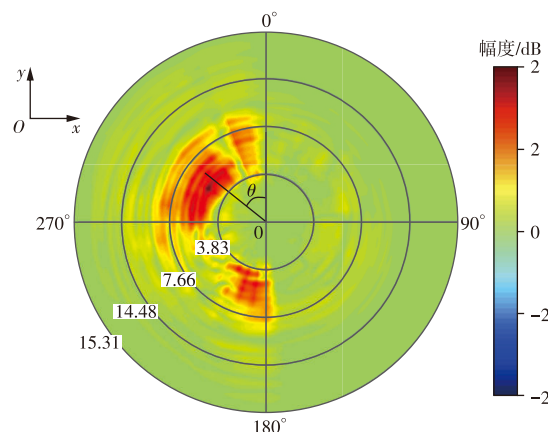


图10 希尔伯特变换结果

Fig. 10 Results of Hilbert transform

4.2.2 距离计算

依据裸眼老井角度计算结果 θ ,结合 θ 对应的 xOz 剖面中速度分析结果,可以获得裸眼老井与新钻井之间的距离,如式(14)所示。

$$s = vt \quad (14)$$

式中: s 为距离,单位m。

5 裸眼井地下定位验证

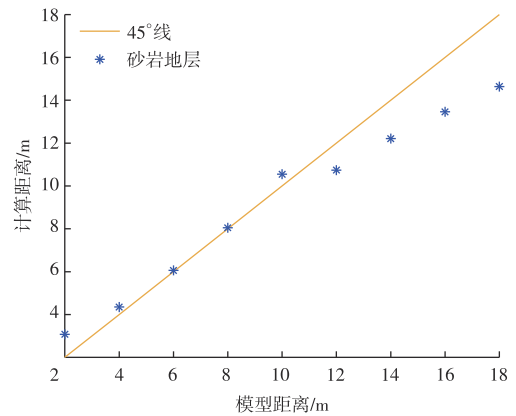
5.1 数值模拟验证

基于数值模拟成像结果,开展裸眼井地下定位计算,裸眼井地下定位结果如表2所示,从表中可以看出,裸眼井地下定位模块可以精准定位反射体的方位,但由于偶极子具有 180° 不确定性,所以地下定位结果会给出2个角度数据(θ_1, θ_2)。在距离定位时,模型设定的距离与裸眼井定位模块计算的距离存在一定误差。

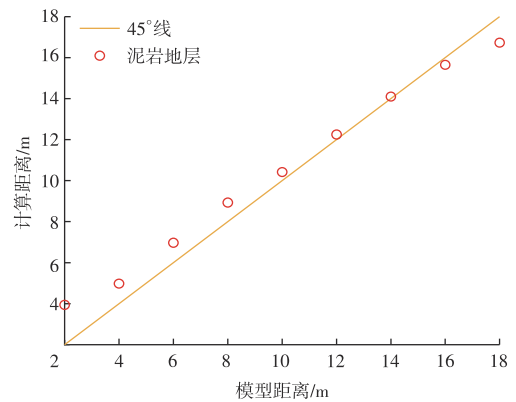
模型距离与计算距离误差如图11,砂岩地层裸眼老井距离误差在12 m后呈现增加趋势,说明速度分析时,从速度谱中提取的速度偏小,导致计算距离偏小。泥岩地层裸眼老井距离误差相对较小,说明声波远探测方法更适用于在泥岩地层开展裸眼井地下定位工作。

5.2 现场试验验证

开展现场试验验证的两井距离约为6 m,采集声波远探测数据并利用裸眼井地下定位计算模块实现老井的定位,结果显示主要分为3个井段:第一井段深度[3 098, 3 155) m;第二井段深度[3 155, 3 211) m;第三井段深度[3 211, 3 240) m。其中,第一井段成像剖面左侧有一明显同相轴,但其幅度并不随角度而发生变化,可能受仪器测量影响,产生虚假反射。第二井段同相轴的幅度随角度而发生变化,角度在 $80^\circ \sim 110^\circ$ 之间,同相轴较为清晰;深度[3 155, 3 183) m,同相轴较为连续,可能存在类似于裂缝的反射体;深度[3 183, 3 211) m,同相轴不连续,以点状分布,可能存在类似于孔洞的反射体。第三井段在所有角度剖面中并未观测到同相轴,说明不存在能够探得的老井。选取第二井段2个深度开展地下定位计算,计算结果如表3所示,从表中可以发现:在



a. 砂岩地层裸眼老井距离误差



b. 泥岩地层裸眼老井距离误差

图11 模型距离与计算距离误差

Fig. 11 Error between model distance and calculated distance

表3 老井定位计算结果

Table 3 Calculation results of old well positioning

深度/m	s/m	$\theta_1/(\circ)$	$\theta_2/(\circ)$
3 165	4.96	49	229
	5.94	49	229
	5.28	69	249
3 175	5.13	39	219
	5.13	49	229
	4.86	59	239
	4.87	79	259
	5.30	89	269

3 165 m 深度处,老井位于南西向或北东向,平均距离为5.39 m;在3 175 m 深度处,老井位于南西向或北东向,平均距离为5.06 m。真实距离为5.00 m。因此,距离定位误差小于0.5 m。

表2 裸眼井地下定位结果

Table 2 Underground positioning results of open-hole wells

模型a					模型b				
预设值		测试值			预设值		测试值		
s/m	$\theta/(\circ)$	s/m	$\theta_1/(\circ)$	$\theta_2/(\circ)$	s/m	$\theta/(\circ)$	s/m	$\theta_1/(\circ)$	$\theta_2/(\circ)$
4.000 0	270	4.347 4	90	270	8.000 0	270	8.051 6	90	270

6 结论与建议

声波远探测技术具备高分辨率,探测深度深的显著优势,可为裸眼老井提供高精度成像数据。利用数值模拟的方法,系统分析了声波远探测成像技术在裸眼老井探测与地下定位的可行性,主要结论如下:

1) 通过开展目标井定位方法研究,改进声波远探测技术在裸眼老井地下定位中的应用效果,成功实现井旁裸眼老井的精准定位。

2) 当目标井与新钻井间距介于4~16 m时,DSI仪器可有效探测泥岩地层的目标井;若需拓展探测距离,可通过延长仪器测量时间和发射功率实现。

3) 提出新型裸眼井定位反演方法,模拟结果与理论模型高度吻合,新钻井与目标井的距离定位误差小于0.5 m。

参考文献

- [1] 董经利,许孝凯,张晋言,等.声波远探测技术概述及发展[J].地球物理学报,2020,35(2):566-572.
DONG Jingli, XU Xiaokai, ZHANG Jinyan, et al. Overview and development of acoustic far detection technology[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(2): 566-572.
- [2] 邓军,王津睿,任帅京,等.声波探测技术在矿井领域中的应用及展望[J].煤田地质与勘探,2023,51(6):149-162.
DENG Jun, WANG Jinrui, REN Shuaijing, et al. Application and prospect of acoustic detection in the mining sector[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(6): 149-162.
- [3] NAGANO K, NIITSUMA H, CHUBACHI N. Automatic algorithm for triaxial hodogram source location in downhole acoustic emission measurement[J]. Geophysics, 2012, 54(4): 508-513.
- [4] WEST C L, KUCKES A F, RITCH H J. Successful ELREC logging for casing proximity in an offshore Louisiana blowout[C]// Paper SPE-11996-MS presented at the 58th Annual Technical Conference and Exhibition, San Francisco, CA, October 1983.
- [5] KUCKES A F. Alternating and static magnetic field gradient measurements for distance and direction determination: US5305212 [P]. 1994-04-19.
- [6] 车阳,乔磊,袁光杰,等.主动磁测距技术在T1井封井工程的应用[J].石油机械,2022,50(2):15-22.
CHE Yang, QIAO Lei, YUAN Guangjie, et al. Application of active magnetic ranging technology in capping operation of well T1[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(2): 15-22.
- [7] KUCKES A F, HAY R T, MCMAHON J, et al. New electromagnetic surveying/ranging method for drilling parallel horizontal twin wells [J]. SPE Drilling & Completion, 1996, 11(2): 85-90.
- [8] ELGIZAWY M, FRASER M, LOWDON R, et al. A novel realtime well collision avoidance monitoring by definitive dynamic surveys and passive magnetic ranging[C]// Paper SPE-211791-MS presented for presentation at the ADIPEC held in Abu Dhabi, UAE, 31 October-3 November 2022.
- [9] KABIRZADEH H, RANGELOVA E, LEE G H, et al. Dynamic error analysis of measurement while drilling using variable geomagnetic in-field referencing[J]. SPE Journal, 2018, 23(6): 2327-2338.
- [10] 朱祖扬.随钻单极子声波测井模式优化及远探测[J].应用声学,2022,41(2):310-317.
ZHU Zuyang. The logging mode optimization and remote detection performance of monopole acoustic logging while drilling[J]. Journal of Applied Acoustics, 2022, 41(2): 310-317.
- [11] 仵杰,雪宇超,路涛,等.各向异性地层中的偶极声波测井响应特性及反演[J].西安石油大学学报(自然科学版),2022,37(4):76-83.
WU Jie, XUE Yuchao, LU Tao, et al. Response characteristics and inversion of dipole acoustic logging in anisotropic formation[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2022, 37(4): 76-83.
- [12] 唐晓明,魏周拓.利用井中偶极声源远场辐射特性的远探测测井[J].地球物理学报,2012,55(8):2798-2807.
TANG Xiaoming, WEI Zhoutuo. Single-well acoustic reflection imaging using far-field radiation characteristics of a borehole dipole source[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(8): 2798-2807.
- [13] 吴柏志,许孝凯,杜群杰.偶极横波远探测方位区分新方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2023,47(6):43-49.
WU Baizhi, XU Xiaokai, DU Qunjie. Novel method for dipole shear wave remote detection azimuth discrimination[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(6): 43-49.
- [14] WEI Z T, TANG X M. Numerical simulation of radiation, reflection, and reception of elastic waves from a borehole dipole source[J]. Geophysics, 2012, 77(6): D253-D261.
- [15] XU J Q, HU H S, LIU Q H. Combination of FDTD with analytical methods for simulating elastic scattering of 3-D objects outside a fluid-filled borehole[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(6): 5325-5334.
- [16] 彭更新,刘威,郭念民,等.基于时空域交错网格有限差分法的应力速度声波方程数值模拟[J].石油物探,2022,61(1):156-165.
PENG Gengxin, LIU Wei, GUO Nianmin, et al. A time-space domain dispersion-relationship-based staggered-grid finite-difference scheme for modeling the stress-velocity acoustic wave equation[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(1): 156-165.
- [17] BEN-MENAHM A, KOSTEK S. The equivalent force system of a monopole source in a fluid-filled open borehole[J]. Geophysics, 1991, 56(9): 1477-1481.
- [18] CHEN L, HUANG J, FU L Y, et al. A compact high-order finite-difference method with optimized coefficients for 2D acoustic wave equation[J]. Remote Sensing, 2023, 15(3): 604.
- [19] 车小花,乔文孝,阎相祯.反射声波成像测井的有限元模拟[J].应用声学,2004,23(6):1-4.
CHE Xiaohua, QIAO Wenxiao, YAN Xiangzhen. Numerical simulation of borehole acoustic-reflection imaging using the finite element method[J]. Journal of Applied Acoustics, 2004, 23(6): 1-4.

(编辑 郭群)