



慢速地层偶极声波远探测井眼成像发射频率优选

孙小芳 刘峰 张聪慧 孙志峰 仇傲 郭尚静

Emission Frequency Optimization of Borehole Imaging for Dipole Acoustic Remote Detection of Slow Formations

SUN Xiaofang, LIU Feng, ZHANG Conghui, SUN Zhifeng, QIU Ao, GUO Shangjing

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023017>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渤海人工岛大型丛式井组加密防碰优化设计技术

Anti-Collision Optimization Design Technology for Large-Scale Infill Drilling for Cluster Well Groups in the Artificial Island of the Bohai Sea

石油钻探技术. 2018, 46(2): 24–29 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018048>

冀东油田人工岛丛式井钻井防碰技术

Anti-Collision Technology for Drilling Cluster Wells in the Artificial Island of Jidong Oilfield

石油钻探技术. 2017, 45(5): 19–22 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201705004>

便携式岩屑声波录井系统研制与测试

Development and Testing of a Portable Acoustic Logging System on Cuttings

石油钻探技术. 2020, 48(6): 109–115 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020141>

利用随钻电磁波测井探测直井水力裂缝的正演模拟

Forward Modeling in Hydraulic Fracture Detection by Means of Electromagnetic Wave Logging While Drilling in Vertical Wells

石油钻探技术. 2020, 48(2): 123–129 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019133>

高精度随钻成像测井关键技术

The Key Technologies of High Precision Imaging Logging while Drilling

石油钻探技术. 2019, 47(3): 148–155 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019060>

随钻高分辨率电阻率成像仪器探测特性研究

The Detection Characteristics of a High Resolution Resistivity Imaging Instrument while Drilling

石油钻探技术. 2019, 47(2): 114–119 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019005>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2023017

引用格式: 孙小芳, 刘峰, 张聪慧, 等. 慢速地层偶极声波远探测井眼成像发射频率优选[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 98-105.

SUN Xiaofang, LIU Feng, ZHANG Conghui, et al. Transmission frequency optimization of borehole imaging for dipole acoustic remote detection of slow formations [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(1): 98-105.

慢速地层偶极声波远探测井眼成像发射频率优选

孙小芳¹, 刘峰², 张聪慧¹, 孙志峰¹, 仇傲¹, 郭尚静¹

(1. 中海油田服务股份有限公司油田技术事业部, 北京 101149; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452)

摘 要: 为了提高慢速地层偶极声波远探测丛式井邻井井眼成像的图像质量, 优选了偶极声源的最佳发射频率。根据慢速地层中偶极辐射声场理论, 计算偶极纵波辐射波能流和辐射指向性, 分析它们随频率的变化规律, 结合试验井测试和现场应用情况, 确定适合浅层慢速地层邻井成像的偶极声源最佳激发频率为 2.4 kHz。研究表明, 在测井资料质量良好的情况下, 采用该激发频率处理得到的邻井远探测成像图清晰可靠, 对图中反射体进行识别, 能够确定邻井相对测量井的距离和方位, 利用此结果可以指导浅层丛式井邻井防碰。研究结果为开发过程中丛式井邻井防碰提供了新的技术手段。

关键词: 丛式井; 偶极纵波; 邻井成像; 偶极声源; 辐射波能流; 最佳激发频率

中图分类号: P631.54

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)01-0098-08

Emission Frequency Optimization of Borehole Imaging for Dipole Acoustic Remote Detection of Slow Formations

SUN Xiaofang¹, LIU Feng², ZHANG Conghui¹, SUN Zhifeng¹, QIU Ao¹, GUO Shangjing¹

(1. Oilfield Technology Department, China Oilfield Services Limited, Beijing, 101149, China; 2. Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin, 300452, China)

Abstract: In order to improve the quality of adjacent borehole imaging of cluster wells by dipole acoustic remote detection of slow formations, the optimal emission frequency of the dipole sonic source was determined. According to the theory of dipole radiation sound field in slow formations, the energy flow of radiation wave and the radiation directivity of dipole P-wave were calculated, and their change law with the frequency variation were analyzed. In combination with the tests in experimental wells and field application, the optimal excitation frequency of the dipole sonic source suitable for adjacent well imaging in shallow and slow formations was determined as 2.4 kHz. The results showed that with good logging data quality, the remote detection imaging map of adjacent wells obtained and processed by the excitation frequency was clear and reliable, and identifying the reflectors in the map could determine the distance and azimuth of adjacent wells to logging wells. The results can guide the anti-collision of adjacent wells in shallow cluster wells and provide a new technical method for the anti-collision of adjacent wells in cluster wells within development phase.

Key words: cluster well; dipole compressional wave; adjacent well imaging; dipole sonic source; energy flow of radiation wave; optimal excitation frequency

海上丛式井井眼轨迹防碰是丛式井钻井的重点问题^[1-6]。采用常规防碰方法时, 对一些有防碰风险的生产井, 需要停产或减产复测井眼轨迹, 这会影响到平台的产量, 甚至可能造成老井无法再次开泵生产; 对于自喷井, 复测井眼轨迹的成本和难度非常

高。另外, 井眼轨迹测量往往存在一定误差, 因此需要采用新的测量技术进行丛式井井眼防碰。偶极声波远探测成像方法是在测量井中激发偶极声源, 声源向井外地层辐射弹性波(包括偶极纵波和偶极横波), 井外弹性波遇到断层、裂缝等井外地层地质体时

收稿日期: 2022-09-22; 改回日期: 2022-12-05。

作者简介: 孙小芳(1979—), 女, 湖北荆州人, 2003年毕业于江汉石油学院勘查技术与工程专业, 2006年获中国地质大学(北京)地球探测与信息技术专业硕士学位, 2010年获中国石油大学(北京)矿物学、岩石学、矿床学专业博士学位, 工程师, 主要从事声波测井相关研究工作。E-mail: sunxf8@cosl.com.cn。

会反射回测量井中, 被井测量井中的接收换能器接收, 利用接收到的偶极反射波进行偏移成像处理, 能得到井外地质体的图像。2012 年以来, 中海油服利用自主研发的偶极横波远探测声波测井仪器和配套的处理解释方法, 在井旁裂缝、断层和溶蚀孔洞等的识别方面取得显著的效果^[7-10]。

研究发现, 在浅层慢速地层中, 横波速度低且衰减较大, 不容易利用横波速度对邻井进行成像, 但偶极声源激发的偶极纵波在软地层中不易衰减且具有方位灵敏度的优点^[11-13], 因此笔者尝试用偶极纵波对浅层丛式井邻井进行成像。传统的单极纵波单极激发频率约为 10 kHz, 偶极声源激发频率为 2~5 kHz, 浅层慢速地层邻井成像时, 采用偶极声源激发, 利用辐射到地层中的偶极纵波进行成像, 激发频率选择高频还是低频需要采用理论与实际应用相结合的方法进行研究。笔者采用数值模拟、试验井测试和现场应用相结合的方法, 确定浅层慢速地层声波远探测邻井成像的最佳偶极声源激发频率为 2.4 kHz; 采用该激发频率处理得到的邻井远探测成像图清晰可靠, 能够确定邻井相对测量井的距离和方位, 可以指导浅层丛式井邻井防碰。

1 井外慢速地层辐射波能流模拟

偶极声源在井中工作的同时, 还向井外地层辐射出弹性波^[14], 包括纵波(P 波), SH 横波和 SV 横波, 通过计算偶极声源向井外辐射的 P 波、SH 横波和 SV 横波的辐射波能流, 偶极纵波的辐射指向性, 并分析它们随偶极声源激发频率变化的规律, 优选出适合浅层慢速地层邻井成像的偶极声源激发频率。

1.1 模拟方法

为了计算慢速地层充液井中偶极声源的辐射波能流及辐射指向性, 采用图 1 所示的坐标系(测量井和目标井径向距离为 r , 偶极声源置于半径为 a 、沿 z 轴延伸的充液井中, u_R , u_φ 和 u_θ 分别为 P 波、SH 横波和 SV 横波产生的位移)。

多极子声场位移势函数在频率-波数域内可以表示为^[15]:

$$\begin{cases} \phi = \frac{1}{n!} \left(\frac{fr_0}{2} \right)^n \frac{\cos(n\varphi)}{4\pi} B_n K_n(pr) e^{ikz} \\ \chi = \frac{1}{n!} \left(\frac{fr_0}{2} \right)^n \frac{\sin(n\varphi)}{4\pi} D_n K_n(sr) e^{ikz} \\ \Gamma = \frac{1}{n!} \left(\frac{fr_0}{2} \right)^n \frac{\cos(n\varphi)}{4\pi} F_n K_n(sr) e^{ikz} \end{cases} \quad (1)$$

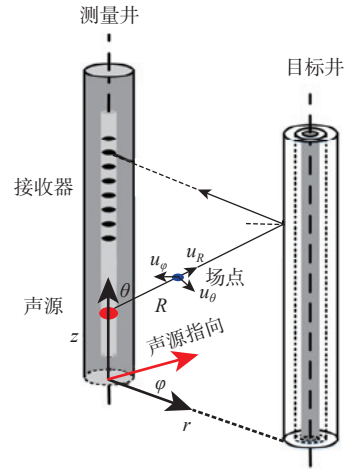


图 1 充液井孔中偶极声源向井旁地层中辐射声场的柱坐标系

Fig.1 A cylindrical coordinate system for the sound radiation field from the dipole sonic source in the liquid-filled borehole to its vicinity

式中: ϕ , χ 和 Γ 分别为固体介质中 P 波、SH 横波和 SV 横波位移势; n 为方位序数, $n=0, 1$ 和 2 分别表示单极、偶极和四极声源; φ 为声源指向与两井平面的夹角, ($^\circ$); r 为测量井和目标井径向距离, m ; k 为轴向波数, m^{-1} ; f 为流体纵波的径向波数, m^{-1} ; p 和 s 分别为地层纵波和横波径向波数, m^{-1} ; K_n 为第二类 n 阶变形柱贝塞尔函数; B_n , D_n 和 F_n 为从内向外传播的声波振幅系数, 与 K_n 有关; r_0 为声源半径, m ; e^{ikz} 为波的传播因子。

在声波远探测测井中, 考虑的是距离井轴数十米的辐射远场, 场点到井轴的辐射距离 R 远大于弹性波的波长, 满足远场近似的条件, 此时运用式(1)求取 P 波、SH 横波与 SV 横波位移势函数的渐近解, 将远场渐近解代入到位移-位移势的关系式, 在忽略 $O(1/R^2)$ 的条件下得到 P 波、SH 横波与 SV 横波远场位移谱的渐进表达式^[16]:

$$\begin{cases} u_R = \left[i \frac{f_{p0}^n r_0^n}{n! 2^n} \rho \alpha \omega B_n(\omega, k_{p0}) \cos(n\varphi) \right] \frac{e^{\frac{i\omega R}{\alpha}}}{4\pi \rho \alpha^2 R} \\ u_\varphi = \left[-i \frac{f_{s0}^n r_0^n}{n! 2^n} \rho \beta \omega D_n(\omega, k_{s0}) \sin \theta \sin(n\varphi) \right] \frac{e^{\frac{i\omega R}{\beta}}}{4\pi \rho \beta^2 R} \\ u_\theta = \left[\frac{f_{s0}^n r_0^n}{n! 2^n} \rho \omega^2 F_n(\omega, k_{s0}) \sin \theta \cos(n\varphi) \right] \frac{e^{\frac{i\omega R}{\beta}}}{4\pi \rho \beta^2 R} \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_{p0} 和 k_{s0} 分别为地层纵波和横波波数的最速下降解, m^{-1} ; α 为地层纵波速度, m/s ; β 为地层横波速度, m/s ; ρ 为地层密度, kg/m^3 ; ω 为圆频率, Hz ; f_{p0} 和

f_{s0} 分别为由 k_{p0} 和 k_{s0} 得到的流体径向波数, m^{-1} ; θ 为声源到辐射场点的辐射方向与 z 轴正方向之间的夹角, ($^\circ$); R 为声源到场点之间的距离, m 。

由多极子声源辐射的远场位移渐近解可以看出, 无论是单极 ($n=0$), 偶极 ($n=1$), 还是四极 ($n=2$), 其远场辐射的几何扩散因子均为 $\frac{1}{R}$, 说明辐射场以球面波的形式向外传播。另外, 由式(2)中的远场位移渐近解可以得到不同阶数声源辐射指向性的表达式, 其中, 偶极声源的辐射指向性为^[17]:

$$\begin{cases} \Re_p^{(1)}(\omega; \theta, \varphi) = i \frac{f_{p0}}{2} \rho \alpha \omega B(\omega, k_{p0}) \cos \varphi \\ \Re_{SH}^{(1)}(\omega; \theta, \varphi) = -i \frac{f_{s0}}{2} \rho \beta \omega D(\omega, k_{s0}) \sin \theta \sin \varphi \\ \Re_{SV}^{(1)}(\omega; \theta, \varphi) = \frac{f_{s0}}{2} \rho \omega^2 F(\omega, k_{s0}) \sin \theta \cos \varphi \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Re_p^{(1)}(\omega; \theta, \varphi)$ 为偶极纵波辐射指向性; $\Re_{SH}^{(1)}(\omega; \theta, \varphi)$ 为偶极 SH 横波辐射指向性; $\Re_{SV}^{(1)}(\omega; \theta, \varphi)$ 为偶极 SV 横波辐射指向性。

在球坐标系中, 利用位移与应变的关系、虎克定律可以进一步得到地层应力表达式^[17], 并且根据 P 波、SH 横波与 SV 横波的远场位移谱的渐进表达式可以得到 R, φ 与 θ 方向上质点的振动速度^[17], 声源辐射到无限大地层中的弹性波以球面波的形式向外传播。半径为 R 的球面上一面元上的能流密度表达式为^[17]:

$$E_{\text{rad}} = -\frac{1}{2} \text{Re}(v_R^* \sigma_{RR} + v_\varphi^* \sigma_{R\varphi} + v_\theta^* \sigma_{R\theta}) \quad (4)$$

式中: E_{rad} 为能流密度, W/m^2 ; $v_R^* \sigma_{RR}$, $v_\varphi^* \sigma_{R\varphi}$ 和 $v_\theta^* \sigma_{R\theta}$ 分别为 P 波、SH 横波和 SV 横波的能流密度, W/m^2 ; v_R^* , v_φ^* 和 v_θ^* 分别为 R, φ 与 θ 方向质点速度的复共轭; σ_{RR} , $\sigma_{R\varphi}$ 和 $\sigma_{R\theta}$ 分别是 R, φ 与 θ 方向的地层应力, Pa ; Re 表示取复数的实部。

把已知的速度分量 v_R, v_φ 和 v_θ 和应力分量 $\sigma_{RR}, \sigma_{R\varphi}$ 和 $\sigma_{R\theta}$ 代入式(4), 得到地层中辐射波的能流密度 E_{rad} , 再将其在以声源为中心、半径为 R 的球面上进行积分, 便可得到辐射波的能流^[17]:

$$W_{\text{rad}} = \begin{cases} 2\pi \int_0^\pi E_{\text{rad}} R^2 \sin \theta d\theta & n=0 \\ \pi \int_0^\pi E_{\text{rad}} R^2 \sin \theta d\theta & n>0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, W_{rad} 为辐射波的能流, W 。

一般浅层井眼尺寸都比较大, 因此计算了井径 0.30 m 条件下 P 波、SH 横波和 SV 横波在慢速地层中的辐射能流曲线 (见图 2, 图中用单位声源功率来

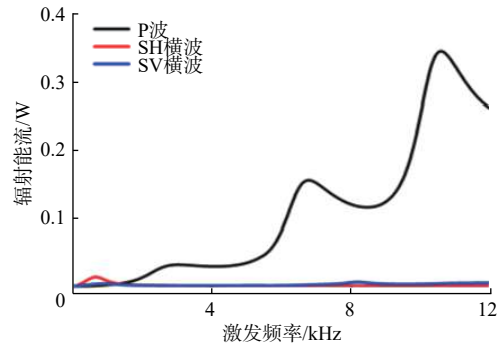


图2 偶极声源在慢速地层中的辐射波能流

Fig.2 Energy flow of radiation wave of dipole sonic source in slow formations

刻度偶极声源产生的能流)。

从图2可以看出, 3种波的能流均随着激发频率变化。对比3种辐射波的能流大小可知, 激发频率低于1.8 kHz时, SH 横波较强, 但在大部分频段辐射纵波较 SH 与 SV 横波的能流要高, 浅层慢速地层偶极声源的辐射远场中纵波占据了主导地位, 因此在浅层超软地层使用偶极纵波进行远探测是合理的。激发频率在3, 7和11 kHz左右时, 偶极纵波都存在峰值。

1.2 偶极纵波辐射指向性

偶极纵波的辐射指向性指的是井中偶极声源向井外辐射纵波的能力, 利用式(3)计算了辐射能流峰值所对应的频率点与2.4 kHz情况下的辐射指向性 (见图3, 图中径向刻度表示单位强度的声源辐射到地层中纵波相对幅度值, 环向刻度表示声源到场点的辐射方向与井轴之间夹角 θ 的取值)。

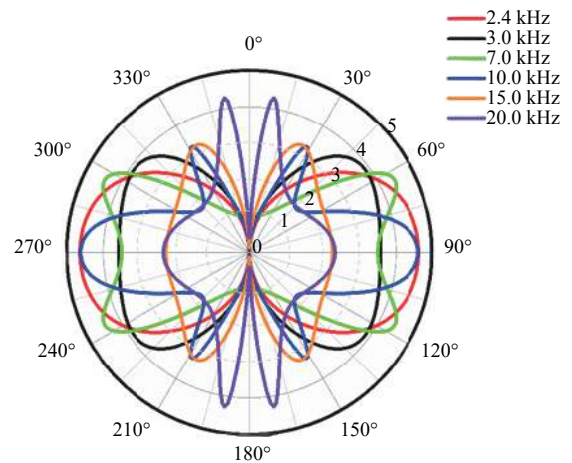


图3 偶极纵波辐射能流峰值点处的偶极纵波辐射指向性
Fig.3 Radiation directivity of dipole P-wave at the peak point of energy flow of dipole P-wave radiation

从图 3 可以看出, 激发频率高时, 能量向两侧低角度移动, 如 10 kHz 时, 探测 30° 夹角的邻井较为合适, 20 kHz 时探测两井垂直的情况下更有利 (两井平行时夹角为 90°), 但是绝大多数两井夹角都是高角度, 而且高频衰减较大。因此, 结合偶极声源的辐射能流和辐射指向性分析, 邻井探测采用低激发频率 (2.4 kHz) 更优。

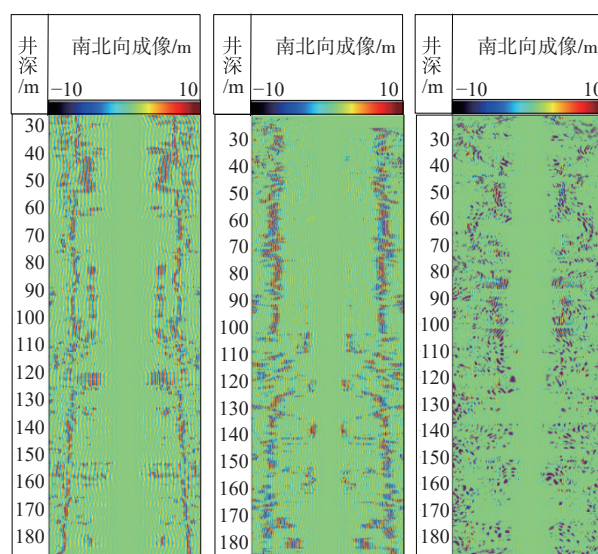
2 偶极声源最佳激发频率试验井测试

在理论模拟的基础上, 选取南北方向井口距离约 5 m 的 2 口试验井进行测试, 优选出浅层慢速地层偶极纵波邻井成像偶极声源最佳激发频率。测量井 A 井在南面, B 井在北面, A 井测量井段 24~200 m, 随着井深增深, 2 口井距离稍有增加。在其他条件不变的情况下, 偶极激发频率分别选取 2.4 和 8.0 kHz, 通过对比分析 2 次测得的邻井远探测成像图, 来确定适合于慢速地层邻井成像的偶极声源最佳激发频率。

2 次测量得到的测井资料质量良好, 激发频率为 2.4 kHz 时处理得到的邻井远探测成像如图 4(a) 所示 (图中, 第一列为井深, 第二列是 0° (180°) 方向上的成像图, 0° 方向为正北方向, 30° 方向为从正北按顺时针方向旋转 30° 所得的方向)。考虑反射体方位角的 180° 不确定性^[18], 也就是目前该方法不能确定该反射体是在井的右侧还是在井的左侧, 因此, 反射体的方位表示为 $A^\circ (A^\circ + 180^\circ)$ 的形式, 具体在井的哪一侧还需要结合其他资料进行综合判定。图 4(a) 中, 反射体在井口距离测量井大约 5 m, 反射体信号最强的方位是 0° (180°), 正是 B 井在 A 井中成的像。

激发频率为 2.4 kHz 时, 分别选取 2~6 kHz, 3~8 kHz 和 6~8 kHz 带通滤波频率, 分析滤波频率对邻井成像结果的影响。滤波频率取 2~6 kHz 时, 反射体从上到下比较连续; 滤波频率取 3~8 kHz 时, 浅层干扰较少, 但在离井较远时, 纵向上反射体不太连续, 但都能看清楚反射体的形态 (见图 4(b)); 滤波频率取 6~8 kHz 时, 没有看到邻井反射体出现 (见图 4(c)), 对比说明可能 2~6 kHz 成分对远探测成像贡献更大。

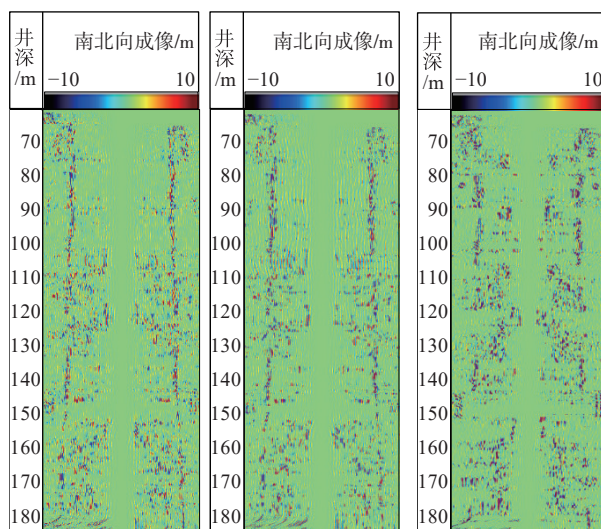
激发频率为 8 kHz 时, 也分别取 2~6 kHz, 3~8 kHz 和 6~10 kHz 这 3 个带通滤波频率, 成像结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 滤波频率选较大的 6~10 kHz 时, 反射体纵向上不连续, 所以即便为高



(a) 滤波频率 2~6 kHz (b) 滤波频率 3~8 kHz (c) 滤波频率 6~8 kHz

图 4 激发频率为 2.4 kHz 时不同滤波频率下的邻井远探测成像图

Fig.4 Imaging map of adjacent wells through remote detection with an excitation frequency of 2.4 kHz under different filtering frequencies



(a) 滤波频率 2~6 kHz (b) 滤波频率 3~8 kHz (c) 滤波频率 6~10 kHz

图 5 激发频率为 8.0 kHz 时不同滤波频率下的邻井远探测成像图

Fig.5 Imaging map of adjacent wells through remote detection with an excitation frequency of 8.0 kHz under different filtering frequencies

频激发, 成像还是相对依赖低频成分; 滤波频率选 3~8 kHz 时, 反射体相对清晰。因此, 激发频率不必选取高频的 8 kHz。

对比图 4(a) 和图 5(a), 发现低频激发时, 反射体纵向上更连续, 也证明了激发频率选取 2.4 kHz 较好。

3 可行性验证

用某区块浅层丛式井网来验证利用 2.4 kHz 偶极发射频率进行慢速地层偶极纵波邻井成像的可行性。

该区块浅层丛式井网密集,图6所示为该区块分别在井深 250 和 380 m 的井眼轨迹平面分布,在该区块 w6 井中采集阵列声波数据,采用偶极纵波反射波成像的方式对 w6 井周围邻井进行成像,以确定各邻井相对测量井的距离和方位。

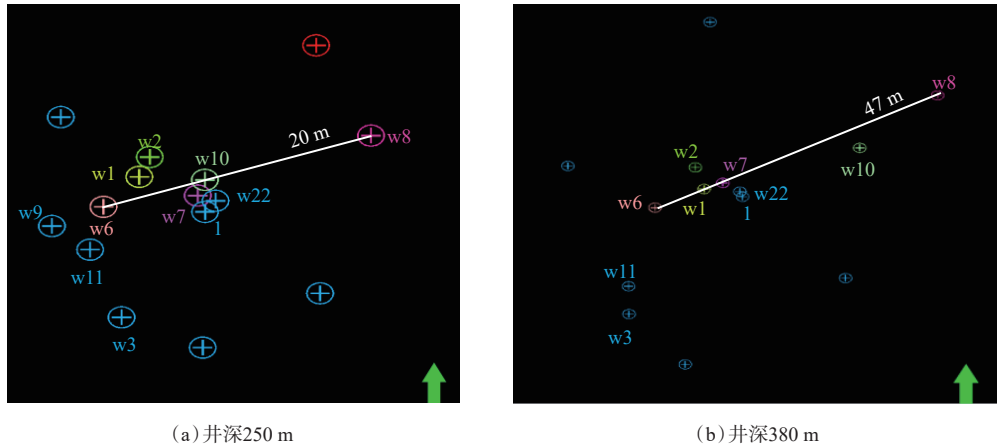


图6 某区块井深 250 和 380 m 处的井位平面分布

Fig.6 Lay out of wellbores at well depth of 250 m and 380 m in a block

w6 井测量井段 200~460 m, 偶极波列前为采集到的偶极纵波, 偶极横波信号较弱, 该地层为慢速地层, 成像结果如图7所示(图中, 第一列为井深, 后面 8 列依次为每隔 30° 的远探测成像图, 横向探测距离为 15 m)。从图7可以看出, 不同方向上识别

出清晰连续的 9 个条带状反射体, 可能为多个邻井在测量井中的成像。

为了与井眼轨迹平面分布图对比, 在偶极纵波远探测成像图井深 250 和 380 m 处, 分别识别了各个反射体距离测量井的距离和方位。在井深 250 m

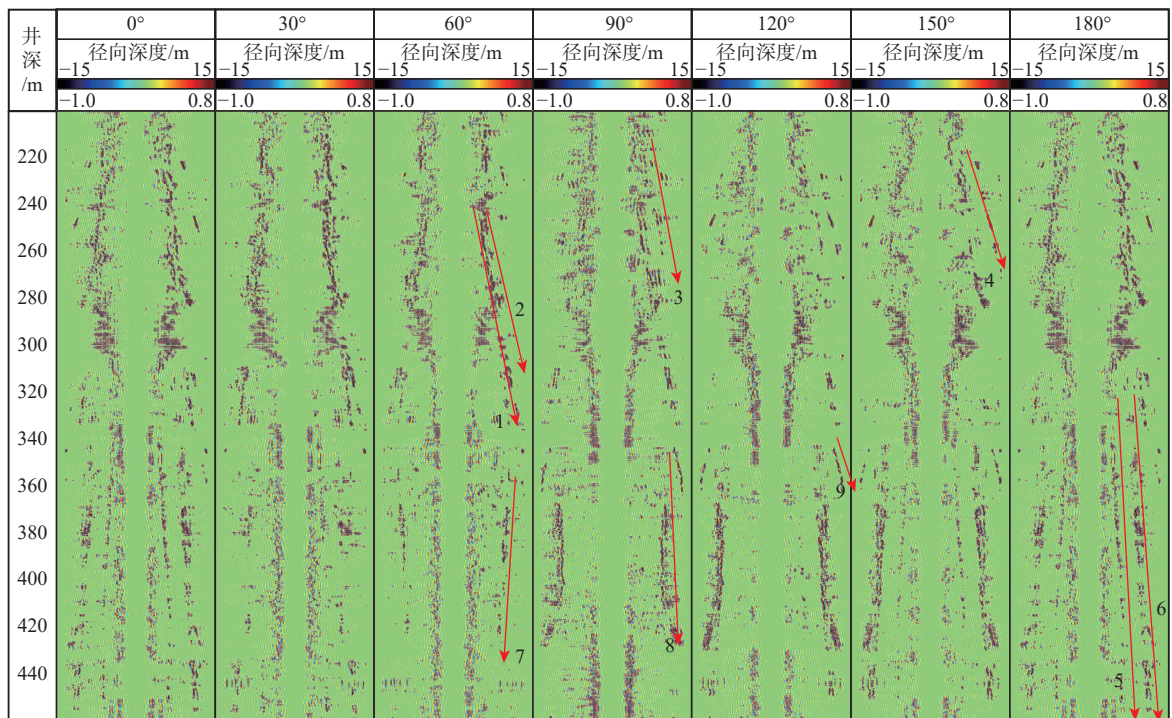


图7 w6 井邻井远探测成像解释成果

Fig.7 Imaging results of adjacent wells of Well w6 through remote detection

处, 1 号反射体距离测量井 6 m, 60°方位上反射信号最强, 对比该区块该井深的井位平面分布, 1 号反射体可能为 w1 井; 2 号反射体距离测量井 7 m, 50°方向上反射信号最强, 对比对应井深的井位平面分布, 2 号反射体可能为 w2 井; 依次分析每条反射体, 反射信息可能代表的邻井信息见表 1, 每个反射体

在井眼轨迹平面分布图中都能找到对应的邻井。
该实例证明偶极声源发射使用 2.4 kHz 的激发频率, 采用声波远探测仪器采集阵列声波数据, 利用偶极纵波反射波偏移成像处理得到的邻井远探测成像图, 能够反映测量井周围邻井的分布状态, 使用该激发频率对浅层丛式井进行成像是可行的。

表 1 远探测成像图中各反射体信息
Table 1 Information of reflectors in remote detection imaging map

反射体 序号	井段/m	反射信息 分布方位/(°)	反射信息 最强方位/(°)	离测量井 距离/m	反射信息可能 代表的邻井	不同井深距测量井的距离/m	
						250 m	380 m
1	240~338	0~120(180~300)	60(240)	2~15	w1井	6	
2	240~310	0~90(180~270)	50(230)	5~15	w2井	7	
3	215~270	60~120(240~300)	90(270)	4~13	w7井或1井或w22井	9	
4	215~270	110~180(290~360)	150(330)	7~15	w3井	11	
5	320~460	140~180(320~360)	170(350)	2~7	w11井		6
6	320~460	140~180(320~360)	180(360)	7~15	w3井		9
7	350~430	30~90(210~270)	70(250)	10~7	w7井		9
8	340~430	80~150(260~330)	90(270)	7~10	1井		9
9	340~360	30~90(210~270)	70(250)	7~9	w22井		

4 现场应用

目前, 新疆试验井已应用偶极纵波邻井成像技术 12 井次, 与现场工程师测量的邻井相对测量井的距离和方位数据吻合。丛式井防碰应用数次, 在测井资料质量良好的情况下, 处理得到的邻井远探测成像图能够确定邻井相对测量井的距离和方位, 为浅层丛式井邻井防碰提供了新的思路和方法。

某浅层丛式井 A1 井, 井旁有一口邻井 A2 井, 距离 A1 井较近, 整个井段上 A2 井相对 A1 井的距离和方位不清, 现要对 A1 井进行侧钻, 采用声波远探测的方式在 A1 井中进行测量, 利用偶极纵波反射波对 A2 井进行成像, 确定 A2 井相对 A1 井的相对位置关系, 指导邻井防碰。

A1 井测量井段 120~335 m, 分析阵列声波数据发现, 224~240 m 井段为双层套管, 且 224~275 m 井段固井质量较差, 偶极纵波不明显。因此, 120~224 和 275~335 m 井段的井旁反射信息比较可靠。

邻井远探测成像结果如图 8 所示, 横向探测距离 10 m, 每隔 30°扫描成像, 224~275 m 井段受固井质量影响, 未见到明显反射信息。140~190 m 井段, 井旁 90°~170°(270°~350°)方向上有一强反

射体, 距井眼 3~4 m, 120°(300°)方向上反射信号最强, 方位信息如图 9(a)所示(图中, 坐标原点代表井轴位置, 横坐标和纵坐标表示声波远探测横向探测距离, 环向刻度 0°表示正北方向, 顺时针旋转到 360°方向)。在 140~190 m 井段进行井间方位扫描, 确认在该井段有一邻井位于 A1 井北偏西 5°~30°方向上, 方位由北向北西方向变化, 且距离与邻井成像距离相当, 分析认为该井段的反射体可能为 A2 井。

270~315 m 井段也有一强反射体, 在 30°~90°(210°~270°)方向上, 距井眼 4~5 m, 60°(240°)方向上反射信号最强, 方位信息如图 9(b)所示。结合井眼轨迹分析结果, 该反射体也可能是 A2 井。综合判断在 140~315 m 井段内, 由浅到深, A2 井自 A1 井的北西方向沿逆时针方向逐渐变化至西南方向, 方位信息如图 9(c)所示, 即 A1 井侧钻风险区间为 350°~210°, 建议避开此区间进行侧钻, 以防止与 A2 井相碰, 最后结合其他资料对 A1 井进行侧钻成功。

以上实例分析结果表明, 在测井资料质量良好的情况下, 处理得到的邻井远探测成像图清晰可靠, 对图中反射体进行识别, 能够确定邻井相对测量井的距离和方位, 利用此结果可以指导浅层丛式井邻井防碰。

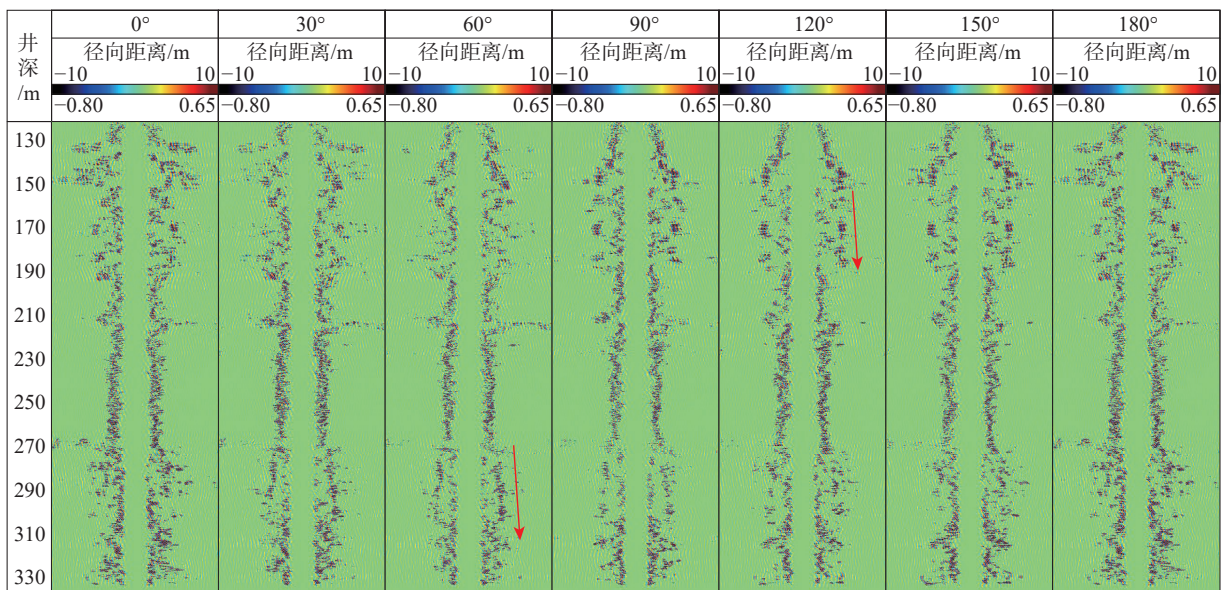


图 8 A1 井邻井成像成果

Fig.8 Imaging results of adjacent wells of Well A1

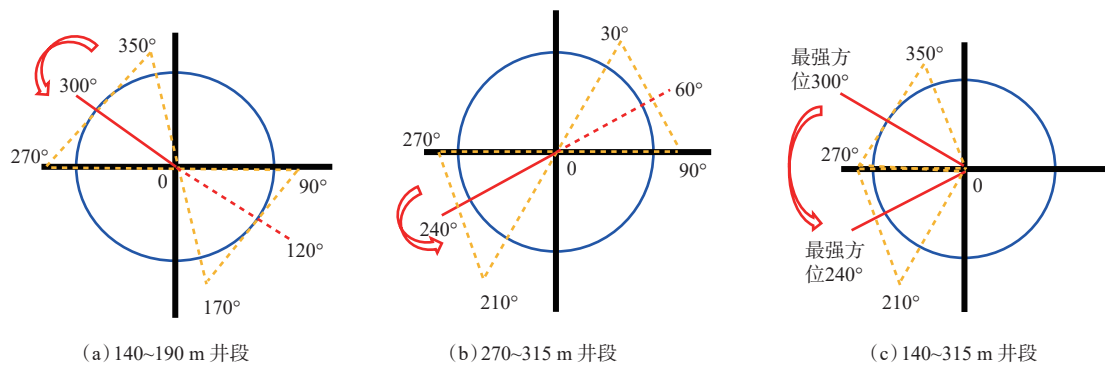


图 9 不同井段 A1 井井旁反射体方位示意

Fig.9 Orientation of reflector near Well A1 in different well sections

5 结 论

1)在浅层慢速地层中,相较于偶极横波,偶极纵波不易衰减,具有更强的幅值,且具有方位灵敏度。在测量井中发射偶极声源作为入射波,探测从井外地层目标井中反射回来的偶极纵波反射信号,能够实现目标井井眼成像,判断目标井的距离和方位。

2)确定了适合浅层慢速地层邻井成像的偶极声源最佳激发频率为 2.4 kHz,为井中偶极辐射器的设计提供了坚实的理论依据。

3)利用偶极纵波远探测测井能判断测量井井眼十几米范围内邻井的距离及方位,与现有定向井井眼轨迹防碰扫描技术相结合,可形成浅层疏松地层丛式井井眼防碰特色技术,为后续侧钻施工、作业方案的制订等提供技术储备。

参 考 文 献

References

- [1] 鲁港,常汉章,邢玉德,等.邻井间最近距离扫描的快速算法[J].石油钻探技术,2007,35(3):23-26.
LU Gang, CHANG Hanzhang, XING Yude, et al. Fast algorithm for scanning the nearest distance among adjacent wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(3): 23-26.
- [2] 刘刚,孙金,何宝生,等.定向井防碰地面监测系统设计及现场试验[J].石油钻探技术,2012,40(1):7-11.
LIU Gang, SUN Jin, HE Baosheng, et al. Design and field test of surface monitoring system for directional wells anti-collision[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(1): 7-11.
- [3] 刘永旺,管志川,史玉才,等.井眼防碰技术存在的问题及主动防碰方法探讨[J].石油钻采工艺,2011,33(6):14-18.
LIU Yongwang, GUAN Zhichuan, SHI Yucai, et al. Discussion on problems of wellbore anti-collision technology and active anti-collision methods[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(6): 14-18.

- [4] 窦新宇, 梁华庆. 丛式井电磁防碰信号采集系统设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2018(2): 109–112.
DOU Xinyu, LIANG Huaqing. Design of electromagnetic anti-collision signal acquisition system for cluster wells[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2018(2): 109–112.
- [5] 伊明, 陈若铭, 万教育, 等. 丛式井、分支井钻井过程中的井眼防碰计算及应用[J]. *新疆石油科技*, 2006, 16(3): 1–8.
YI Ming, CHEN Ruoming, WAN Jiaoyu, et al. Calculation and application of anti-collision during the process of drilling cluster wells and branch wells[J]. *Xinjiang Petroleum Science & Technology*, 2006, 16(3): 1–8.
- [6] 鲁港, 邢玉德, 吴俊林, 等. 邻井防碰计算的快速扫描算法[J]. *石油地质与工程*, 2007, 21(2): 78–81.
LU Gang, XING Yude, WU Junlin, et al. A fast anti-collision scanning algorithm of adjacent well[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2007, 21(2): 78–81.
- [7] 牛德成, 陈鸣, 张聪慧, 等. 低频偶极横波远探测测井在南海油田的应用[J]. *测井技术*, 2019, 43(2): 190–194.
NIU Decheng, CHEN Ming, ZHANG Conghui, et al. Application of low-frequency dipole shear wave remote sensing technology in South China Sea Oilfield[J]. *Well Logging Technology*, 2019, 43(2): 190–194.
- [8] 张聪慧, 祁晓, 尚锁贵, 等. 偶极横波远探测典型地质体解释模型研究及应用[J]. *应用声学*, 2017, 36(5): 401–408.
ZHANG Conghui, QI Xiao, SHANG Suogui, et al. Application of forward modeling to typical geological characterization using dipole reflection imaging[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2017, 36(5): 401–408.
- [9] 郝仲田, 孙小芳, 刘西恩, 等. 偶极横波远探测测井技术应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(5): 2172–2177.
HAO Zhongtian, SUN Xiaofang, LIU Xien, et al. The application research of dipole acoustic reflection imaging technology[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(5): 2172–2177.
- [10] 庄春喜, 燕菲, 孙志峰, 等. 偶极横波远探测测井数据处理及应用[J]. *测井技术*, 2014, 38(3): 330–336.
ZHUANG Chunxi, YAN Fei, SUN Zhifeng, et al. Data processing and applications of dipole shear-wave imaging logging[J]. *Well Logging Technology*, 2014, 38(3): 330–336.
- [11] LEE S Q, CHEN Ming, GU Xihao, et al. Application of four-component dipole shear reflection imaging to interpret the geological structure around a deviated well[J]. *Applied Geophysics*, 2019, 16(3): 291–301.
- [12] LI Zhen, QI Qiaomu, HEI Chuang, et al. Elastic-wave radiation, scattering, and reception of a dipole acoustic logging-while-drilling source in unconsolidated formations[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 879345.
- [13] LI Zhen, SU Yuanda, TANG Xiaoming, et al. A hybrid method to simulate elastic wave scattering of three-dimensional objects[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 144(4): EL268–EL274.
- [14] 牛德成, 苏远大. 基于声波远探测的浅海软地层邻井井眼成像方法[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(6): 21–27.
NIU Decheng, SU Yuanda. Adjacent borehole imaging method based on acoustic remote detection in shallow unconsolidated formations[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(6): 21–27.
- [15] 唐晓明, 郑传汉. 定量测井声学[M]. 赵晓敏, 译. 北京: 石油工业出版社, 2004: 22–23.
TANG Xiaoming, ZHENG Chuanhan. Quantitative borehole acoustic methods[M]. ZHAO Xiaomin, translated. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 22–23.
- [16] TANG Xiaoming, CAO Jingji, WEI Zhoutuo. Shear-wave radiation, reception, and reciprocity of a borehole dipole source: with application to modeling of shear-wave reflection survey[J]. *Geophysics*, 2014, 79(2): T43–T50.
- [17] 曹景记, 唐晓明, 苏远大, 等. 充液井中多极声源的辐射效率[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(2): 757–766.
CAO Jingji, TANG Xiaoming, SU Yuanda, et al. Radiation efficiency of a multipole acoustic source in a fluid-filled borehole[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(2): 757–766.
- [18] 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.

[编辑 滕春鸣]