

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2021020

引用格式: 杨书博, 乔文孝, 赵琪琪, 等. 随钻前视声波测井钻头前方声场特征研究 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(2): 113-120.

YANG Shubo, QIAO Wenxiao, ZHAO Qiqi, et al. Study on the characteristics of the acoustic field ahead of the bit in "look-ahead" acoustic logging while drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(2): 113-120.

随钻前视声波测井钻头前方声场特征研究

杨书博^{1,2}, 乔文孝³, 赵琪琪⁴, 倪卫宁^{1,2}, 吴金平^{1,2}

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206; 3. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249; 4. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 新疆克拉玛依 834000)

摘 要: 现有声波测井仪器无法满足前视探测需求, 为此开展了基于相控阵技术的随钻前视声波测井技术研究。采用相控线阵声波辐射器和相控圆弧阵声波接收站, 分别实现声波能量的定向辐射和扫描接收; 利用有限差分算法, 分别模拟了随钻条件下钻头前方存在一个地层界面时的单极和相控阵声波测井响应。模拟结果表明, 由于井底散射的影响, 随钻前视声波测井的波场比常规反射声波测井的声场更为复杂; 与单极声波辐射器相比, 相控线阵声波辐射器能够定向增强辐射到钻头前方地层中的声波能量, 可以显著增强 P-P 回波的幅度; 与单极声波接收器相比, 通过统计相控圆弧阵声波接收站扫描接收到的不同方位 P-P 回波的幅度, 可以近似判断钻前地层界面的方位。研究结果验证了利用相控阵声波测井技术探测钻前地质异常体的可行性, 为后续工业样机的开发提供了理论依据。

关键词: 随钻测井; 声波测井; 前视; 相控阵; 地质异常体; 回波

中图分类号: P631.8⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)02-0113-08

The Characteristics of the Acoustic Field Ahead of the Bit in "Look-Ahead" Acoustic Logging While Drilling

YANG Shubo^{1,2}, QIAO Wenxiao³, ZHAO Qiqi⁴, NI Weining^{1,2}, WU Jinping^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 102206, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 102206, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resource & Prospecting (China University of Petroleum (Beijing)), Beijing, 102249, China; 4. China University of Petroleum (Beijing) at Karamay, Karamay, Xinjiang, 834000, China)

Abstract: As the existing acoustic logging tools cannot meet the requirements of "look-ahead" detection, the research on "look-ahead" acoustic logging-while-drilling (LWD) was performed based on the phased array technology. The directional radiation and scanning reception of acoustic energy were realized by the linear phased array (LPA) acoustic wave radiator and arcuate phased array (APA) acoustic receiver stations. The responses of monopole and phased array acoustic logging with a formation interface ahead of the drill bit are numerically simulated by the finite-difference algorithm. The results showed that the acoustic fields of "look-ahead" acoustic LWD are more complex than those of conventional acoustic reflection logging, because of the wave scattering at the well bottom. Compared with the monopole acoustic radiator, the amplitude of P-P echo can be significantly enhanced by directionally enhancing the acoustic energy radiated into the formation ahead of the drill bit with LPA acoustic wave radiator. Compared with the monopole acoustic receiver, the APA acoustic receiver station can approximately determine the azimuth of the formation interface ahead of the drill bit by analyzing the amplitude distribution of P-P echo waves in the scanning reception waveforms. The research results confirmed that detecting geological anomalies ahead of the drill bit with phased array acoustic logging is feasible, and it can provide a theoretical basis for the development of industrial prototypes.

Key words: logging while drilling; acoustic logging; look-ahead; phased array; geological anomalies; echo wave

收稿日期: 2020-09-10; 改回日期: 2020-12-24。

作者简介: 杨书博 (1994—), 男, 河南开封人, 2014 年毕业于中国石油大学 (华东) 勘查技术与工程专业, 2020 年获中国石油大学 (北京) 地质资源与地质工程专业博士学位, 助理研究员, 主要从事声波测井正反演、随钻测量编解码和地质导向等方面的研究工作。E-mail: yangsb.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“海相深层高温高压钻完井工程基础理论及控制方法” (编号: U19B6003-05)、国家重点研发计划项目“复杂油气智能钻井理论与方法” (编号: 2019YFA0708301) 联合资助。

钻井过程中, 钻头前方地质异常体信息的不确定性, 不仅会影响目的层的钻遇率, 还会极大地增加钻井作业的风险^[1-4]。因此, 在钻井过程中实时获取钻头与地质异常体的距离以及地质异常体的方位等参数至关重要。目前可行的解决方案主要有随钻地震技术^[5-7]和随钻电阻率测井技术^[8-13], 而适用于钻前地质异常体探测的声波测井技术尚未得到广泛研究。Tang Xiaoming 等人^[14-18]研究了电缆和随钻反射声波测井识别井旁地质异常体的能力, 但未考虑钻头前方存在地质异常体的情况。王菁等人^[19-20]研究了随钻条件下井孔(井眼)未贯通时的声波测井响应特征, 但他们的研究均是基于传统的随钻单极或偶极声波测井仪器进行的。然而, 传统的随钻声波测井仪器难以满足随钻前视声波测井的测量要求, 这是因为随钻前视声波测井的探测目标主要是钻头前方的地质异常体, 而传统的随钻声波测井仪器的声源和接收器不能在轴向上对声场进行控制, 只有很少的一部分能量能够向着钻头前方的地层辐射, 并从地层中的地质异常体处散射(或反射)回井孔, 形成回波信号, 严重影响了仪器对钻头前方地质异常体的探测性能。因此, 如何提高回波信号的幅度, 是一个亟需解决的问题。另外, 随钻前视探测过程中仪器与地质异常体表面近乎垂直, 而传统的随钻声波测井仪器的声源和接收器不能在周向上对声场进行控制, 接收信号反应的是井周 360°范围内的测量响应的平均特征, 无法准确获得地质异常体的方位信息。因此, 如何在三维空间内对钻头前的地质异常体进行准确定位, 也是一个十分重要的问题。

相控阵声波辐射器和接收站可以实现声波的定向辐射和接收, 已成功应用于裸眼井、套管井和随钻测井中^[17-18]。与传统的声波测井仪器相比, 相控阵声波测井仪器具有更大的探测深度和更高的测量分辨率, 为解决随钻前视声波测井中的难题提供了技术思路。因此, 笔者基于相控阵技术, 提出了一种适用于钻前地质异常体探测的随钻前视声波测井方案, 并通过数值模拟验证了该方案的可行性。

1 技术原理

将随钻单极声波测井仪器改进为相控阵声波测井仪器, 改进后仪器的声系由 1 个相控线阵(linear phased array, LPA)声波辐射器和若干个相控圆弧阵

(arcuate phased array, APA)声波接收站组成(见图 1)。相控线阵声波辐射器由轴向上均匀分布的 6 个辐射阵元(记为 TE1—TE6)组成, 每个辐射阵元独立辐射声波能量^[17]; 相控圆弧阵声波接收站由周向上均匀分布的 8 个接收阵元(记为 RE1—RE8)组成, 每个接收阵元独立接收声波能量^[18]。基于波束形成原理, 相控阵声波辐射器和接收站可以分别用于实现声波能量的定向辐射和扫描接收^[17-18]。

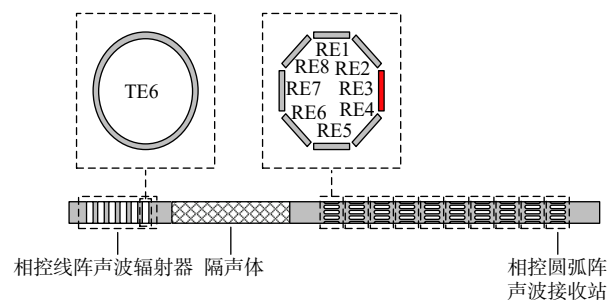


图 1 相控阵声波测井仪器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the phased array acoustic logging tool

对于相控线阵声波辐射器, 通过控制各辐射阵元所施加激励信号之间的延迟时间等参数, 可使声场在靠近钻头的方位满足同相位叠加条件, 从而定向增强辐射到钻头前方的能量(见图 2(a))。因此, 相控线阵声波辐射器有助于提高回波信噪比。对于相控圆弧阵声波接收站, 将相邻几道独立接收的波形进行延迟叠加处理, 可以得到任意方向的扫描接收波形。当扫描接收方位角与入射波的方位角完全相同时, 接收子阵中各阵元接收的波形满足同相位叠加条件(见图 2(b)), 扫描接收波形的幅度得到明显增强; 反之, 当扫描接收方位角与入射波的方位角不同时, 扫描接收波形的幅度不会增强, 甚至可能削弱。因此, 相控圆弧阵声波接收站有助于提高随钻声波测井仪器方位量的准确度。

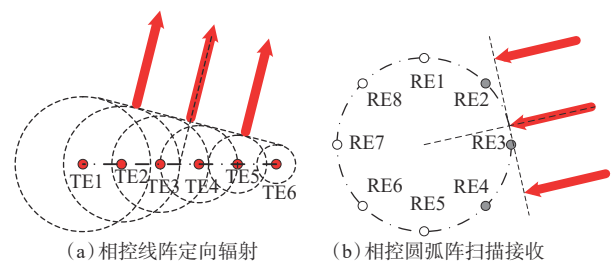


图 2 相控阵原理示意

Fig.2 Schematic diagram of phased array principle

2 计算模型及方法

采用三维直角坐标系有限差分算法^[21],分别模拟钻前存在地层界面时单极声波测井仪器和相控阵声波测井仪器的测量响应。计算模型如图3所示。模型中,井轴与 z 轴平行, x 方向的坐标为0.50 m, y 方向的坐标为1.00 m; RD_a 为轴向参考方向, RD_c 为周向参考方向。

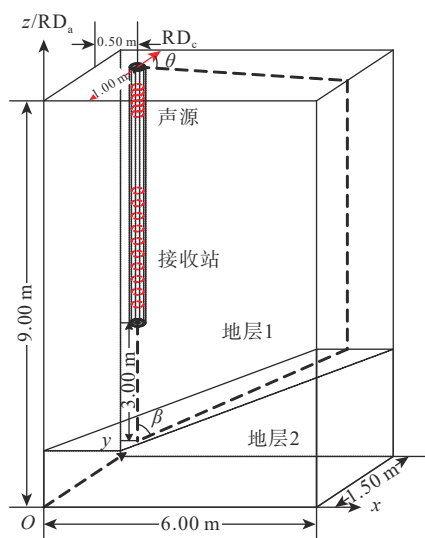


图 3 随钻前视声波测井计算模型示意

Fig.3 Calculation model of “look-ahead” acoustic LWD

钻头前方存在一个地层界面,地层界面满足方程 $x - 0.5y - 2z + 1 = 0$, 即井轴与地层界面的夹角 β 为 60.79° , 地层界面的方位角 θ 为 116.57° 。随钻单极仪器的声系由 1 个单极声波辐射器和 10 个单极声波接收器组成; 随钻相控阵仪器的声系由 1 个相控线阵声波辐射器和 10 个相控圆弧阵声波接收站组成。声源中心点在 z 方向的坐标为 8.50 m, 井底中心点到声源中心点的距离 5.00 m, 前视距离为 3.00 m。声源所施加的激励信号的峰值频率为 10 kHz。相控阵测量时, 相邻辐射阵元间距为 6.0 cm, 相邻辐射阵元所施加的激励信号的延迟时间为 20 μs 。接收阵元 RE1—RE8 的方位角分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$ 和 315° 。在各相控圆弧阵声波接收站中正对地层界面的方位 (116.57°) 设置了一个虚拟接收阵元, 以实现回波信号的最有利接收。计算模型中各介质的参数见表 1。

此外, 计算了各种条件下无界面模型中的声场, 以获得井孔直达波波形。无界面模型的计算参数

表 1 计算模型中各介质参数

Table 1 Parameters of each media in calculation model

类型	纵波波速/(m·s ⁻¹)	横波波速/(m·s ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)	外半径/m
流体	1 500	0	1 000	0.027
钻铤	5 860	3 130	7 800	0.090
流体	1 500	0	1 000	0.117
地层1	2 700	1 200	2 000	
地层2	4 500	2 600	2 500	

与有界面模型的计算参数相同,只是钻头前方没有地层界面。用有界面模型的接收波形减去无界面模型的接收波形,可得回波波形。

3 测井响应分析

3.1 波形特征

单极测量和相控阵测量得到的不同时刻的波场快照如图 4 所示。相控阵测量时的井孔直达波和回波与单极测量时的井孔直达波和回波的类型相同但相对幅度不同。根据传播路径的不同,接收站接收到的波主要包括 TR、TBR、TIR、TBIR 和 TIBR 波等 5 类(见表 2)。TR 和 TBR 波均与地层界面无关,统称为井孔直达波;TIR、TBIR 和 TIBR 波均与地层界面有关,统称为回波。本算例中,在井孔中传播的波可以分为钻铤波、滑行纵波、内斯通利波和外斯通利波等 4 种形式(地层为软地层,单极声源不能在井孔中产生滑行横波);在地层中传播的波可以分为地层纵波和地层横波 2 种形式。钻铤波、纵波、横波、内斯通利波和外斯通利波分别记为 C、P、S、inST 和 outST。当井孔中传播的波或者地层中传播的波到达井底时,各种波均会产生模式转换现象,在井孔中可以转换为 C、P、inST 和 outST 等 4 种二次波,在地层中可以转换为 P 和 S 等 2 种二次波。

相控阵测量时,不同源距的 116.57° 方位(地层界面所在方位)接收阵元接收到的井孔直达波和回波波形的波形如图 5 所示。分析各模式波的到时曲线可知,井孔直达波中,TR-C 波到时最早,TBR-outST-outST 波到时最晚,TR 波的到时随着源距的增大而增长,TBR 波的到时随源距的增大而缩短。回波中,TBIR-C-P-P 波到时最早,TIR-P-P、TBIR-C-P-P、TBIR-P-P-P、TIBR-P-P-C 和 TIBR-P-P-P 波的到时十分接近,发生混叠,形成了一个混合波包;TIR-P-S、TIR-S-P 和 TIR-S-S 波到时较晚。由于模式转换次数较少,混合波包中 TIR-P-P 波的能量占主导地位。因此,类似于方位反射声波测

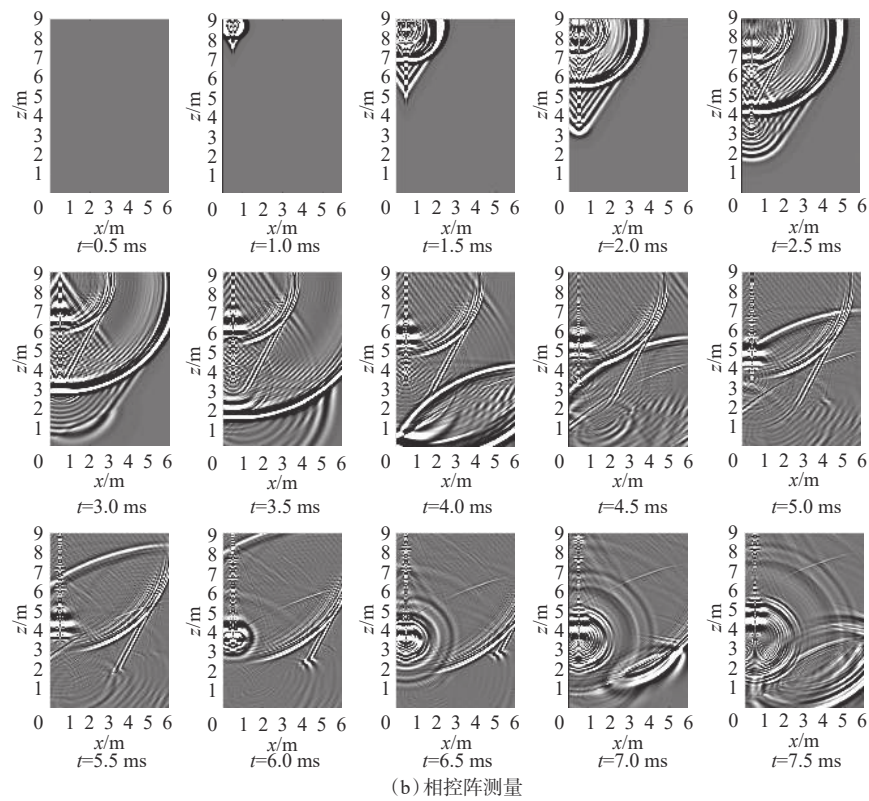
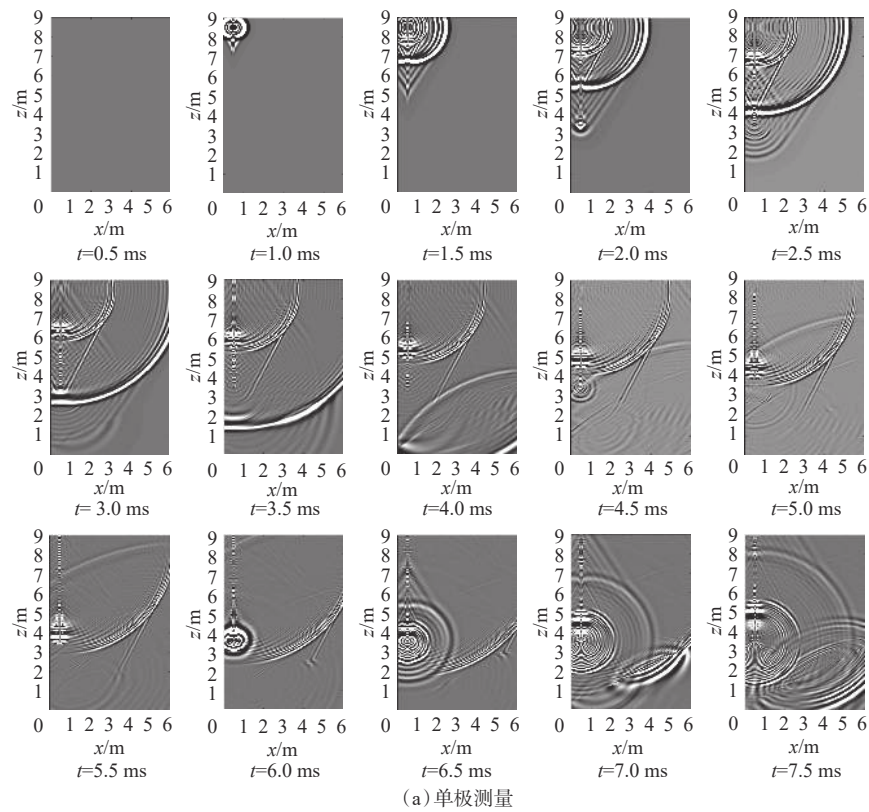


图4 不同时刻的波场快照

Fig.4 Snapshots of wave fields at different times

井^[16-18], 将混合波包作为主要研究对象, 统称为 P-P 回波。

3.2 基于相控线阵声波辐射器的定向辐射效果

单极测量和相控阵测量时, 源距为 3.00 m 时的

表 2 接收波形的传播路径及形式

Table 2 Transmission paths and forms of received waveforms

波类型	传播路径	传播形式
TR	从声源直接传播至接收器	钻铤波、滑行纵波、内斯通利波、外斯通利波
TBR	首先从声源传播至井底	钻铤波、滑行纵波、内斯通利波、外斯通利波
	再从井底传播至接收器	钻铤波、滑行纵波、内斯通利波、外斯通利波
TIR	首先从声源传播至地层界面	地层纵波、地层横波
	再从地层界面传播至接收器	地层纵波、地层横波
TBIR	首先从声源传播至井底	钻铤波、滑行纵波、内斯通利波、外斯通利波
	然后从井底传播至地层界面	地层纵波、地层横波
	最后从地层界面传播至接收器	地层纵波、地层横波
TIBR	首先从声源传播至地层界面	地层纵波、地层横波
	然后从地层界面传播至井底	地层纵波、地层横波
	最后从井底传播至接收器	钻铤波、滑行纵波、内斯通利波、外斯通利波

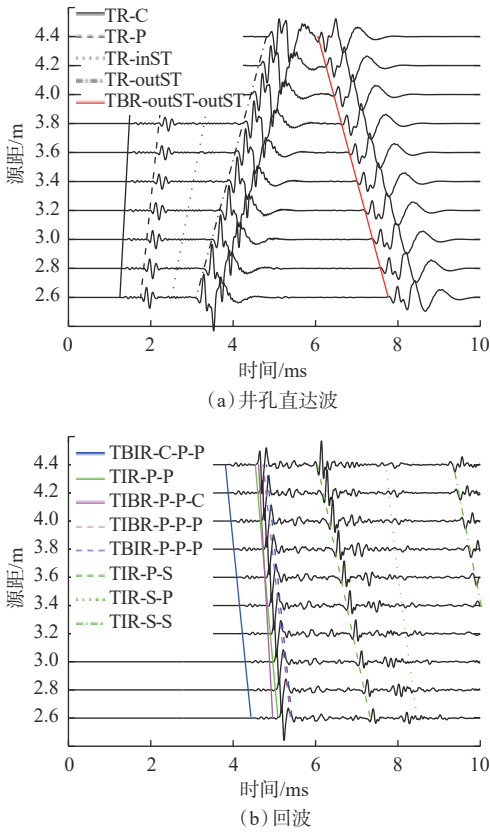


图 5 不同源距下相控阵测量的接收波形
Fig.5 Received waveforms at different offsets in phased array measurement

井孔直达波与回波波形如图 6 所示。单极测量时，回波波形的幅度放大了 800 倍。相控阵测量时，接收阵元的方位角为 116.57°(地层界面所在方位)，回波波形的幅度放大了 85 倍。由图 6 可知，单极测量回波的幅度远远小于井孔直达波的幅度，P-P 回波

峰峰值约为井孔直达波峰峰值的 1/800；相控阵测量 P-P 回波的峰峰值约为井孔直达波峰峰值的 1/85，幅度比明显增大。

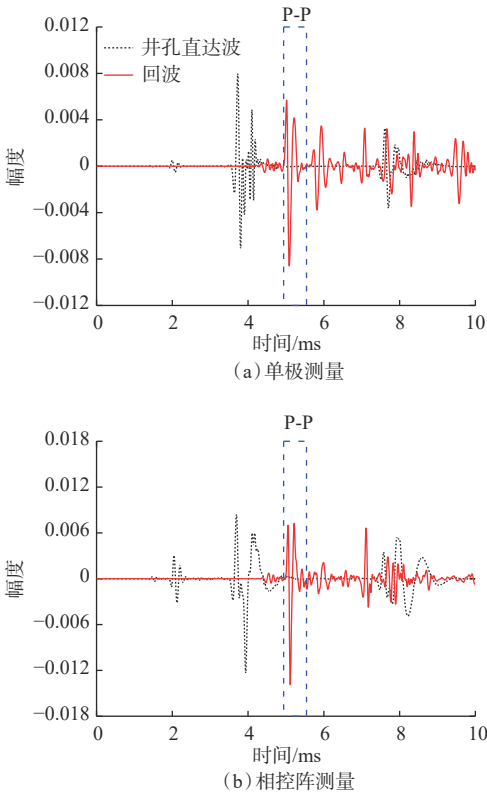


图 6 源距为 3.00 m 时单极测量和相控阵测量的井孔直达波与回波波形
Fig.6 Direct and echo waveforms in the monopole and phased array measurements at an offset of 3.00 m

源距为 3.00 m 时，单极测量接收器接收到的回波波形与相控阵测量 116.57°方位(地层界面所在方

位)接收阵元接收到的回波波形如图7所示(其中,单极测量时的回波波形的幅度放大15倍)。由图7可知,相控阵测量P-P回波的峰峰值约为单极测量P-P回波的峰峰值的15倍。因此,与单极测量相比,相控阵测量时的回波信号具有更高的信噪比,且更容易从混合信号中提取出来。

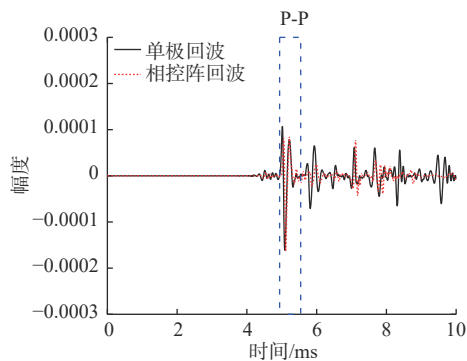


图7 源距为3.00 m时单极测量的回波波形和相控阵测量的回波波形

Fig.7 Comparison of echo waveforms in the monopole and phased array measurements at an offset of 3.00 m

3.3 基于相控圆弧阵声波接收站的独立接收效果

相控阵测量时,不同源距的相控圆弧阵声波接收站的独立接收回波波形如图8所示。由图8可知,独立接收时,90°方位(近似地层界面的方位角)接收阵元所接收到的P-P回波到时最早、幅度最大。分别开窗统计独立接收模式下P-P回波的峰峰值,并进行归一化处理,得到了P-P回波的归一化幅度随方位角的分布曲线(见图9)。由图9可知,源距分别为3.00, 3.60和4.20 m时,相控圆弧阵声波接收站独立接收到的P-P回波幅度最大值所对应的方位角均为90°(地层界面的方位角为116.57°)。由此可知,当钻头前方存在一个地层界面时,基于相控圆弧阵声波接收站的独立接收回波波形可以近似获得该地层界面的方位角。但是,由于相控圆弧阵声波接收站独立接收模式的方位测量准确度较低,测量结果与地层界面真实方位角有较大误差(在本算例中约为27°)。

3.4 基于相控圆弧阵声波接收站的扫描接收效果

基于波束形成原理,分别对各相控圆弧阵声波接收站的独立接收回波波形进行了扫描接收处理^[18]。对于每个相控圆弧阵声波接收站,方位角间隔为1°,从0°方位角到360°方位角,共合成360道波形。相控阵测量时,不同源距接收站的扫描接收回波波形如图10所示(图10显示尺度为图8显示尺度的

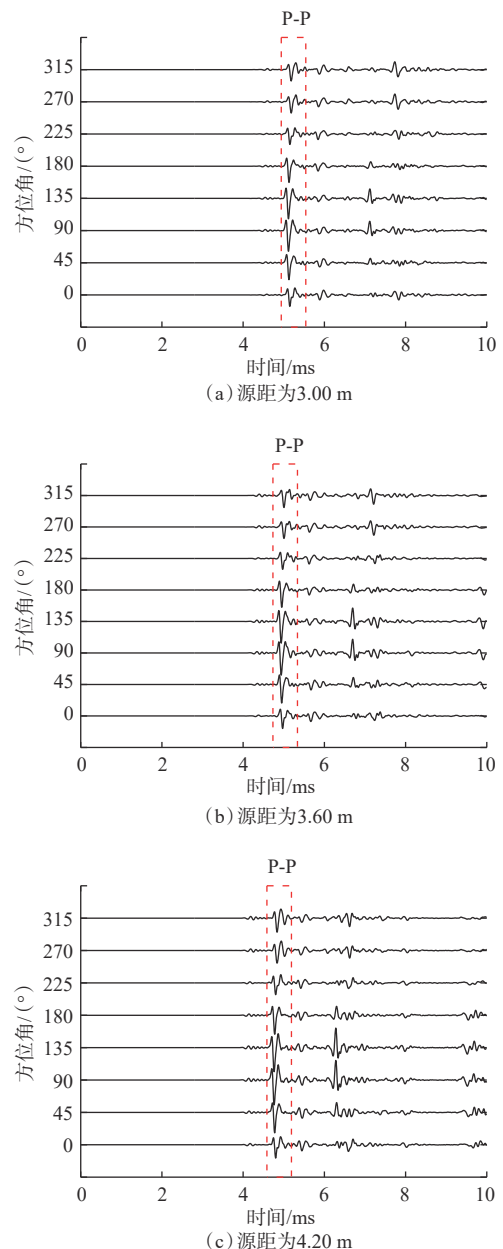


图8 不同源距下相控圆弧阵声波接收站的独立接收回波波形

Fig.8 Individual-reception echo waveforms of APA acoustic receiver stations at different offsets

2倍。为了便于显示,图10中的方位间隔为15°。由图10可知,75°~135°范围内P-P回波的幅度明显强于其他方位回波的幅度。

分别开窗统计扫描接收模式下P-P回波的峰峰值,并进行归一化处理,得到了P-P回波的归一化幅度随方位角的分布曲线(见图11)。由图11可知,源距分别为3.00, 3.60和4.20 m时,相控圆弧阵声波接收站扫描接收到P-P回波幅度最大值所对应的方位角均为112°(地层界面的方位角为116.57°)。由此可知,当钻头前方存在一个地层界面时,基于相

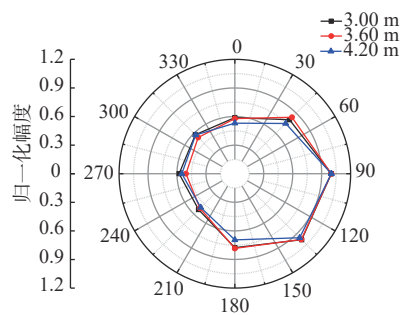
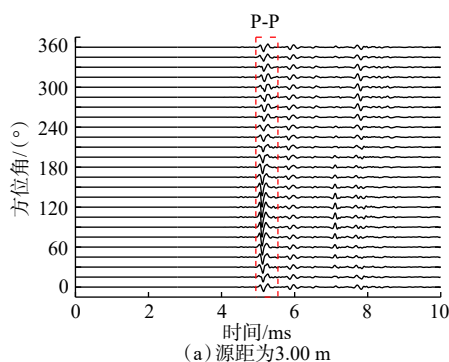
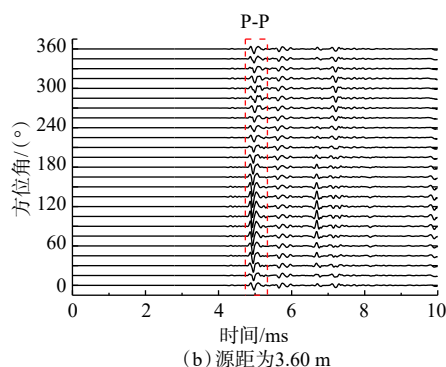


图 9 不同源距下独立接收 P-P 回波最大幅度随方位角的分布曲线

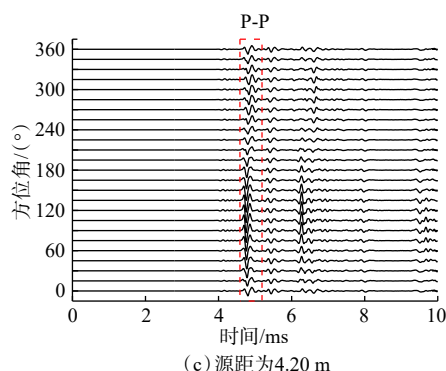
Fig. 9 Distribution curves of maximum amplitude for individual-reception P-P echo waves with azimuths at different offsets



(a) 源距为 3.00 m



(b) 源距为 3.60 m



(c) 源距为 4.20 m

图 10 不同源距相控圆弧阵声波接收站的扫描接收回波波形
Fig. 10 Scanning-reception echo waveforms of APA acoustic receiver stations at different offsets

控圆弧阵声波接收站扫描接收回波的波形可以较为准确地获得该地层界面的方位角。在本算例中, 测量结果与地层界面真实方位角的平均误差约为 4.6° 。与独立接收模式相比, 基于扫描接收模式的相控圆弧阵声波接收站的方位测量准确度更高。

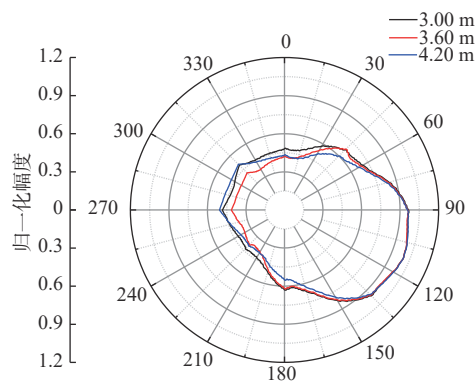


图 11 不同源距下扫描接收 P-P 回波最大幅度随方位角的分布曲线

Fig. 11 Distribution curves of maximum amplitude for scanning-reception P-P echo waves with azimuths at different offsets

4 结论与建议

1) 建立了随钻前视声波测井三维有限差分数值模拟模型, 模拟了随钻条件下钻头前方存在一个地层界面时的单极和相控阵声波测井响应。钻前地质异常体的存在会导致出现回波信号, 为后续开发工业样机提供了理论依据。

2) 采用对比分析方法, 验证了相控阵声波测井技术在钻前地质异常体探测中的优越性。相控线阵声波辐射器解决了单极声波辐射器的辐射指向性无法控制的问题, 通过定向增强辐射到钻头前方地层中的声波能量, 可以使 P-P 回波的幅度明显增大; 相控圆弧阵声波接收站解决了单极声波接收器无方位分辨能力的问题, 通过统计相控圆弧阵扫描接收到不同方位 P-P 回波的幅度, 可在一定误差范围内判断钻前地质异常体所在的方位。

3) 本文仅是理论探索研究, 研究结果均是在数值模拟基础上得到的, 建议今后根据实际随钻测井资料进一步验证和改进模型。

参 考 文 献

References

- [1] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 石油工程技术对油气勘探的支撑与未

- 来攻关方向思考:以中国石化油气勘探为例[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(2): 1-9.
- MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. The support of petroleum engineering technologies in trends in oil and gas exploration and development: case study on oil and gas exploration in Sinopec[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(2): 1-9.
- [2] 王敏生, 光新军, 皮光林, 等. 低油价下石油工程技术创新特点及发展方向[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(6): 1-8.
- WANG Minsheng, GUANG Xinjun, PI Guanglin, et al. The characteristics of petroleum engineering technology design and innovation in a low oil price environment[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(6): 1-8.
- [3] 房超, 项德贵, 赵庆, 等. 地质导向软件发展现状、趋势及国产化建议[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(4): 385-392.
- FANG Chao, XIANG Degui, ZHAO Qing, et al. Development status and trend of geosteering software and the suggestions for its localization[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(4): 385-392.
- [4] 林听, 苑仁国, 韩雪银, 等. 随钻地质导向智能决策的实现与应用[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(1): 1-5.
- LIN Xin, YUAN Renguo, HAN Xueyin, et al. Realization and application of the intelligent geosteering decision making while drilling[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(1): 1-5.
- [5] 史鸿祥, 李辉, 郑多明, 等. 基于随钻地震测井的地震导向钻井技术:以塔里木油田哈拉哈塘区块缝洞型储集体为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 662-668.
- SHI Hongxiang, LI Hui, ZHENG Duoming, et al. Seismic guided drilling technique based on seismic while drilling (SWD): a case study of fracture-cave reservoirs of Halahatang Block, Tarim Oilfield, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4): 662-668.
- [6] 路保平, 袁多, 吴超, 等. 井震信息融合指导钻井技术[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1227-1234.
- LU Baoping, YUAN Duo, WU Chao, et al. A drilling technology guided by well-seismic information integration[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1227-1234.
- [7] 高永德, 刘鹏, 杜超, 等. 随钻地震技术在莺歌海盆地高温高压地层钻井中的应用[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(4): 63-71.
- GAO Yongde, LIU Peng, DU Chao, et al. The application of seismic while drilling in high temperature, high pressure reservoirs of the Yinggehai Basin[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(4): 63-71.
- [8] 路保平, 倪卫宁. 高精度随钻成像测井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 148-155.
- LU Baoping, NI Weining. The key technologies of high precision imaging logging while drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 148-155.
- [9] WANG Lei, FAN Yiren. Fast inversion of logging while drilling azimuthal resistivity measurements for geosteering and formation evaluation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 176: 342-351.
- [10] WANG Lei, DENG Shaogui, ZHANG Pan, et al. Detection performance and inversion processing of logging-while-drilling extra-deep azimuthal resistivity measurements[J]. *Petroleum Science*, 2019, 16: 1015-1027.
- [11] 李亨, 刘迪仁, 倪小威, 等. 钻井液侵入情况下随钻电磁波电阻率测井的响应[J]. 断块油气田, 2019, 26(5): 675-680.
- LI Heng, LIU Diren, NI Xiaowei, et al. Logging responses of electromagnetic wave resistivity while drilling with drilling fluid intrusion[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2019, 26(5): 675-680.
- [12] 杨震, 于其蛟, 马清明. 基于拟牛顿法的随钻方位电磁波电阻率仪器响应实时反演与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(3): 120-126.
- YANG Zhen, YU Qijiao, MA Qingming. Real time inversion and field test of LWD azimuthal electromagnetic waves based on quasi-Newton method[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(3): 120-126.
- [13] 黄明泉, 杨震. 随钻超深电磁波仪器探测深度及响应特征模拟[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 114-119.
- HUANG Mingquan, YANG Zhen. Simulation to determine depth of detection and response characteristics while drilling of an ultra-deep electromagnetic wave instrument[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1): 114-119.
- [14] TANG Xiaoming. Imaging near-borehole structure using directional acoustic-wave measurement[J]. *Geophysics*, 2004, 69(6): 1378-1386.
- [15] TANG Xiaoming, PATTERSON D J. Single-well S-wave imaging using multicomponent dipole acoustic-log data[J]. *Geophysics*, 2009, 74(6): WCA211-WCA223.
- [16] WANG Hua, TAO Guo, SHANG Xuefeng. A method to determine the strike of interface outside of borehole by monopole borehole acoustic reflections[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 133: 304-312.
- [17] YANG Shubo, QIAO Wenxiao, CHE Xiaohua. Numerical simulation of acoustic fields in formation generated by linear phased array acoustic transmitters during logging while drilling[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 182: 106184.
- [18] YANG Shubo, QIAO Wenxiao, CHE Xiaohua, et al. Numerical simulation of acoustic reflection logging while drilling based on a cylindrical phased array acoustic receiver station[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 183: 106467.
- [19] 王菁, 张秀梅. 偶极声波实现钻前地质探测的方法研究[J]. 应用声学, 2015, 34(6): 539-546.
- WANG Jing, ZHANG Xiumei. Study on the method of formation detection ahead of the drill-bit using downhole dipole source[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2015, 34(6): 539-546.
- [20] PAN Yue, HE Xiao, CHEN Hao, et al. Reflection signals and well-bore scattering waves in acoustic logging while drilling[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2020, 17(3): 552-561.
- [21] 杨书博, 乔文孝, 车小花. 基于MPI和OpenMP的三维弹性波方程混合并行有限差分算法[J]. 应用声学, 2018, 37(1): 75-82.
- YANG Shubo, QIAO Wenxiao, CHE Xiaohua. A hybrid parallel finite difference algorithm for 3D elastic wave equation based on MPI and OpenMP[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2018, 37(1): 75-82.