

Application Analysis of Quadrupole Acoustic Logging While Drilling Technology in Deep-Water Block of Western South China Sea

Shiyue Wang*, Ming Chen, Benqiang Sun, Chao Du, Dianqiang Sun

Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang Guangdong
Email: wangshy26@cnooc.com.cn

Received: Apr. 6th, 2018; accepted: Apr. 20th, 2018; published: Apr. 28th, 2018

Abstract

During exploration stage in deep-water block of western South China Sea, there are two main challenges for drilling engineering and formation evaluation: 1) How to obtain real-time high quality full wave train information in strong noise and deep-water unconsolidated formation. 2) Applying real-time acoustic data to improve the prediction accuracy of formation depth and pressure. The high quality real-time full wave train data, which acquired from the newest version quadrupole acoustic logging while drilling technology, could monitor the real-time pressure and analyze borehole stability by calibrating the original rock mechanics model. After analyzing the quality of real-time quadrupole acoustic data, calculation method and the influence factors of the drilling environment in the Lingshui block—Western South China Sea, our results prove that this technology has great application values in the exploration of oil and gas field, which could largely improve the safety of drilling operation and optimize the economic benefits.

Keywords

Acoustic Logging While Drilling, Real-Time Data, Drilling Operation Risk, South China Sea

随钻四极子声波技术在南海西部深水区钻探中的应用分析

王世越*, 陈 鸣, 孙本强, 杜 超, 孙殿强

中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江

*通讯作者。

摘要

在南海西部深水区的钻探阶段, 钻井工程与地层评价主要面临着如何在强噪音、深水疏松地层中实时获得高品质的全波列信息, 以及应用实时随钻声波数据提高层位与压力预测精度这两个挑战。利用最新一代的随钻四极子声波技术能够获取高质量的实时全波列数据, 对初始的岩石力学模型进行刻度从而进行实时压力监测与井眼稳定性分析。本文对在南海西部陵水区块服务的新一代随钻四极子声波数据质量、影响实时数据质量的钻井环境及计算方法进行了分析, 结果表明, 随钻四极子声波技术的应用提高了钻井作业的安全系数, 优化了经济效益, 在油田勘探中具有较强的应用价值。

关键词

随钻声波, 实时数据, 钻井风险, 中国南海

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于复杂的沉积环境及地质构造, 南海西部深水地层孔隙压力和地层破裂压力相差不大, 导致安全钻井的钻井液比重窗口偏窄, 进而导致各种各样的钻井风险。为了更好的降低钻井风险, 可以利用钻井过程中或已钻井的声波数据计算安全钻井的钻井液比重窗口, 进而评估钻井风险[1] [2] [3]。

电缆声波测井技术的不足之处主要体现在: 1) 测井作业滞后于钻井, 一般是在地层钻开后数天甚至数周才进行电缆测井; 若是停止钻井来进行测井则会大大增加成本, 尤其是深水钻井作业, 单日作业综合费用一般都在一百万美元左右。2) 声波资料受到井筒条件和复杂环境的影响, 如钻井液侵入和井壁不规则会导致测量误差, 往往是完钻时间越长情况越严重。3) 对于很多应用, 包括孔隙压力预测和井筒稳定性分析, 需要在钻井过程中采集数据, 并尽早使用这些数据, 才能体现这些数据的价值, 而电缆声波测井数据只能用于钻后评价, 对钻井实时评价作用甚微。近几年随着随钻测井技术的快速发展, 在钻井过程中可以采集越来越多的随钻测井数据, 特别是在高风险的钻井项目中, 实时数据有助于实现实时储层评价和决策, 从而降低钻井风险。

常规随钻声波测井技术由于受到钻杆挠曲波的干扰导致无法准确识别地层横波, 而新一代随钻四极子声波测井技术克服了钻杆挠曲波的干扰, 能获得所有类型地层的全波列资料, 这一点用单极子与偶极子声源无法做到, 获取的实时声波数据质量优良, 为实时评价提供坚实的基础, 包括实时井震标定优化套管下深、实时孔隙压力监测及井壁稳定性分析等。目前国内对于随钻四极子声波测井技术还处于研发阶段, 国外的一些大型石油服务公司相继推出了随钻四极子声波测井仪器, 如贝克休斯公司的 Sound Trak 仪器, 哈里伯顿公司的 QBAT 仪器, 斯伦贝谢公司的 Sonic Scope 仪器; 随钻四极子声波测井技术目前在国内外石油天然气钻探领域已经广泛应用, 在国内主要应用于海上钻探[4] [5] [6] [7]。本文重点介绍了新

一代随钻四极子声波测井工具 Sonic Scope 的设计和算法，以及几个探井应用实例的展示。

2. 技术介绍

2.1. 仪器基本结构与技术参数

Sonic Scope 随钻声波测井仪器能在不同模式下采集井下资料。它提供的成果取决于采集的资料类型和处理方式，但不同专业的数据应用人员，包括钻井工程师、地球物理工程师、地质师、油藏工程师和完井工程师都能使用该仪器提供的信息。该仪器采用功能强大的宽带发射器，并在井筒内以单极子和四极子两种模式激发声波，频率范围从 1 kHz 到 20 kHz，四极子模式下记录数据频率最低为 2 kHz。在仪器外侧的保护槽内有 48 个声波接收器用于采集单极子和四极子模式声波数据，彼此间隔 4 英寸，保护槽之间以 90°角分开(如图 1 所示)。接收器排列成四个阵列，每排阵列包含 12 个数字转换器，每个转换器对应一个传感器，因此可以提供 12 个轴向和 4 个方位的测量值。通过优化发射器到接收器之间的距离，使信噪比达到最大。SonicScope 测井仪器最高工作温度 150°C，最高工作压力 173 MPa，配置了 2 GB 的存储器，即使记录速度达到每秒一次，也能保证存储所有测量模式下记录的数据。

目前 SonicScope 测井仪器有三种尺寸，直径分别为 4-3/4 英寸、6-3/4 英寸和 8-1/4 英寸，以满足不同尺寸井眼。SonicScope 测井仪器通常在现场进行编程，记录高频单极子资料以获得快地层的纵波和横波时差数据，记录低频单极子资料和四极子资料，分别用于获得慢地层的斯通利波和横波时差数据。通过声波频散分析(采用反演算法使记录结果与模拟响应达到最佳拟合)，能提取到低于 2000 微秒/米(600 微秒/英尺)的横波时差值。SonicScope 测井仪器与其他 MWD 和 LWD 测井仪器完全兼容。

2.2. 关键性处理技术特点

首先，Sonic Scope 测井仪器采用宽频多极子发射器和接收器，频率范围从 1 kHz 到 20 kHz，工具能够记录更多低频信息。接收器安装在工具本体的外围，这使得接收器更靠近地层，从而记录到高信噪比的优质数据。接收器间距为 4 英寸，是目前业界最小的，避免了接收间距过大产生假频信号，也有助于提供更高质量更精确的声波时差数据。

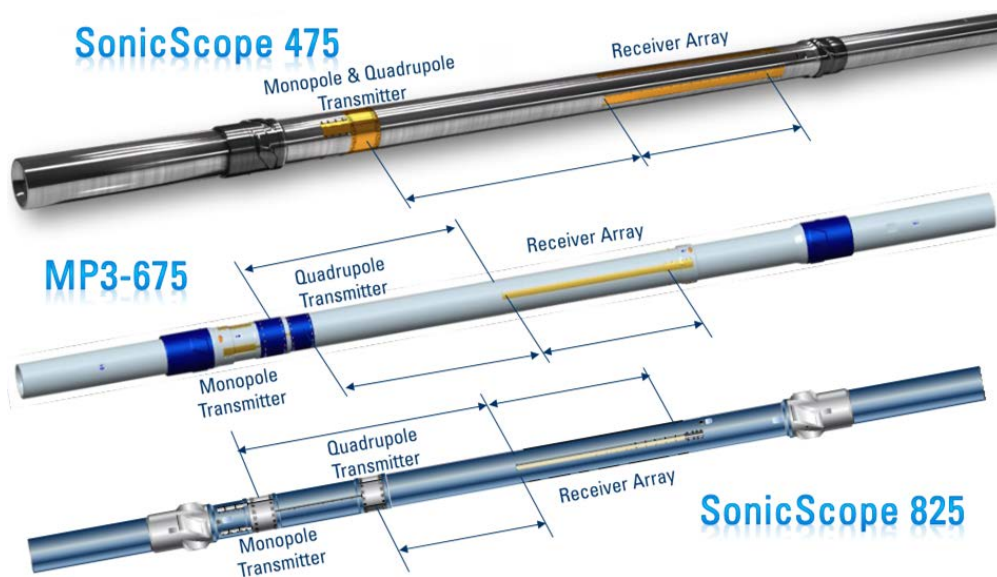


Figure 1. SonicScope tool sketch
图 1. SonicScope 测井仪器示意图

其次，噪音衰减部分是该仪器重要的一个机械设计，它能够更好的衰减直接沿钻铤传播到接收器的直达波噪音[8]。此外，软件方面通过有限差分模拟算法，进一步减弱钻铤直达波噪音，从而记录更高质量的纵波、横波及斯通利波等信息。仪器在井下实时计算也采用有限差分模拟算法去除钻铤直达波，并且不影响数据质量，从而提供更准确的实时信息。

第三，声波工具的居中性对于提供更纯净的激发模式以及高质量的数据至关重要。新一代随钻声波仪器采用两个斜刀翼扶正器螺旋固定在仪器上下两端，以保证工具的居中性，同时这种设计提供了更大的过流面积，有助于提高井眼清洁。

最后，仪器本身具有“自诊”能力和强大的井下计算能力，从而使得井下仪器实时计算的数据质量远远高于老一代随钻声波仪器。48个接收器中每一个接收器都有一个内置的信号测试装置，自动探测该接收器是否工作正常。仪器会对工作不正常和失效信号进行快速分析，并且自动设置对失效信号进行补偿，从而保证高质量的实时数据。强大的处理能力能够使该仪器进行模态分解以保证记录数据之前各个测量模式的纯粹性，同时对数据进行叠加最后得到实时处理的声波数据[9] [10]。

图2是新一代随钻声波测井仪器采集的实时和内存数据处理结果对比图(最后一道)，二者匹配良好，证明在钻井过程中钻具粘卡很严重的环境下仍然获得了高质量的实时数据。高质量的随钻声波实时数据极大的扩展了声波资料的用途，尤其是在降低钻井风险方面。

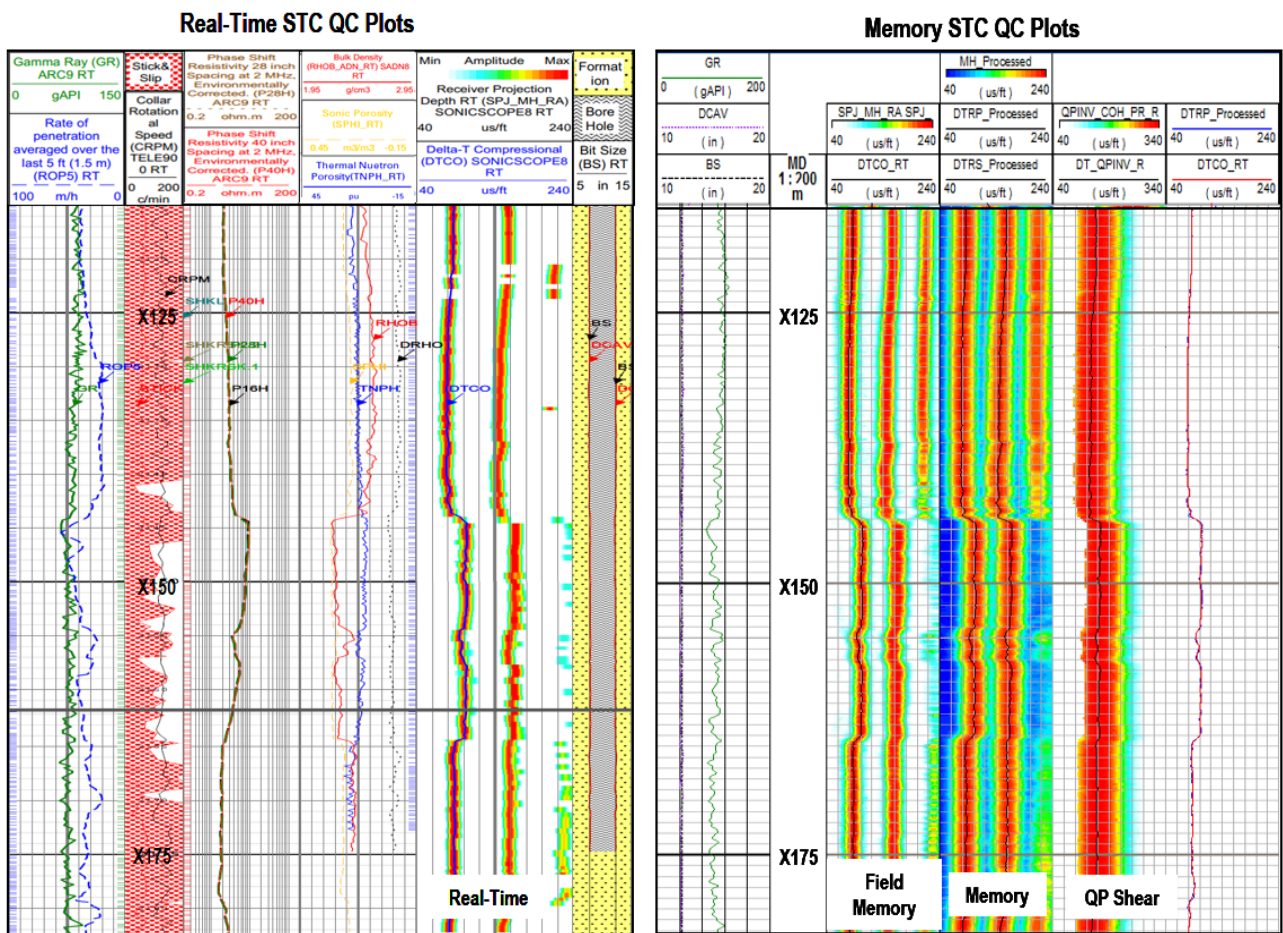


Figure 2. High quality of both real-time and memory data
图2. 高质量的实时和内存声波数据

3. 南海深水区应用实例分析

到目前为止，Sonic Scope 随钻声波测井仪器在南海西部深水几口井中进行了数据采集。其独特的设计和先进的井下模拟处理能力使之能够提供多种测量模式，从而保障获取高质量的纵波数据，同时无论地层快慢都能获取连续的横波数据，证明 Sonic Scope 仪器充分适用于中国南海深水区高挑战性地层的测量。从实时数据和内存处理数据比较来看，新一代随钻声波测井仪器提供的实时数据质量可靠，与内存处理数据的吻合很好。图 3 所示的是中国南海深水区 LSXX 井中声波实时数据和内存处理数据对比[11]，可见二者非常吻合。通过几口井的跟踪对比，证明新一代随钻声波测井仪器提供的实时数据质量是可靠的，结合其他测量资料如地层密度等，声波测井数据可广泛应用于钻井、地层评价、完井等领域，包括实时井震标定、优化套管程序、岩石力学分析、固井质量评价、孔隙度与含气饱和度计算及渗透率反演等应用，下面列举了几个应用案例。

3.1. 克服慢地层对气层识别影响

在中国南海深水区地层速度相对较慢，尤其是慢速地层储层含气的情况下，发射信号的频率经过地

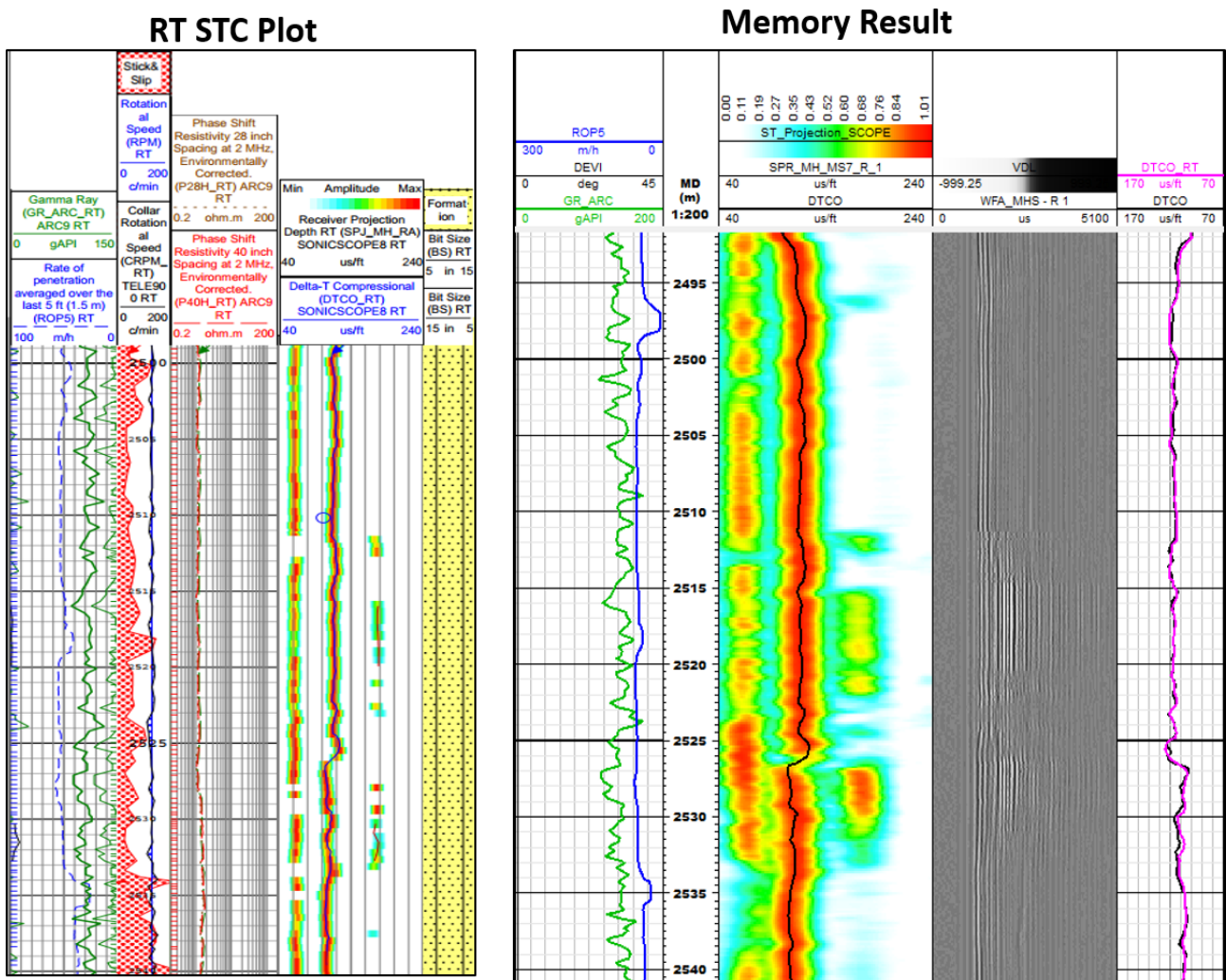


Figure 3. Good match between real-time and memory sonic data

图 3. 实时和内存声波数据对比

层滤波，频带变得更低，在这种情况下，泄漏模式纵波处理是必不可少的。泄漏模式纵波处理需要足够的低频信息从而得到一个稳定、可靠的结果，处理过程需要复杂的参数以及对参数多次调试，因此在实时测量情况下井下随钻声波测井仪器很难提供有效的结果。图 4 是在慢速地层含气情况下采集的数据实例，气层段的地层时差是利用泄漏模式纵波处理得到的。可以明显的看到常规处理(左图)和泄漏模式纵波处理结果(中间图)的差异。

3.2. 实时井震标定和钻前深度预测

实时声波数据最普遍的一个应用就是计算合成地震记录、在钻井过程中及时准确标定钻头在 seismic 剖面上的位置，优化下套管的位置。合成地震记录是利用实时声波数据和密度数据综合计算得到的。通过合成地震记录跟地面地震数据对比标定，识别地质层位并分析其与地面地震的相关性。这个技术能够帮助预测钻头前方目的层的深度位置。

利用声波数据进行实时井震标定和预测钻头前方目标体深度位置的方法原理简单易行，但是对实时声波数据质量要求很高，同时要了解钻井区块的地质背景。首先要对声波数据和地面地震数据进行层位解释，建立初始的速度模型以便进行钻头前方目标体的深度预测。接下来，利用实时的声波数据计算反射系数，并与子波褶积合成地震记录。然后利用合成地震记录跟地面地震进行相关性分析，标定当前钻头的位置。由于利用地面地震速度建立的速度模型具有不确定性，合成地震记录和地面地震不可避免的存在差异。调整实时声波数据保证与地面地震资料的匹配，从而更新已钻地层的初始速度模型并保持未钻地层的初始速度模型。利用更新后的速度模型标定钻头在地面地震上的位置并预测钻头前方的地质体深度。

图 5 是利用声波测量成功确定 12-1/4 英寸井眼下套管位置的实例，其目的是将 9-5/8 英寸套管下深尽可能靠近储层上部但不能钻开储层。根据钻前设计，计划下套管位置在斜深 3175 m (垂深 2750 m)。利

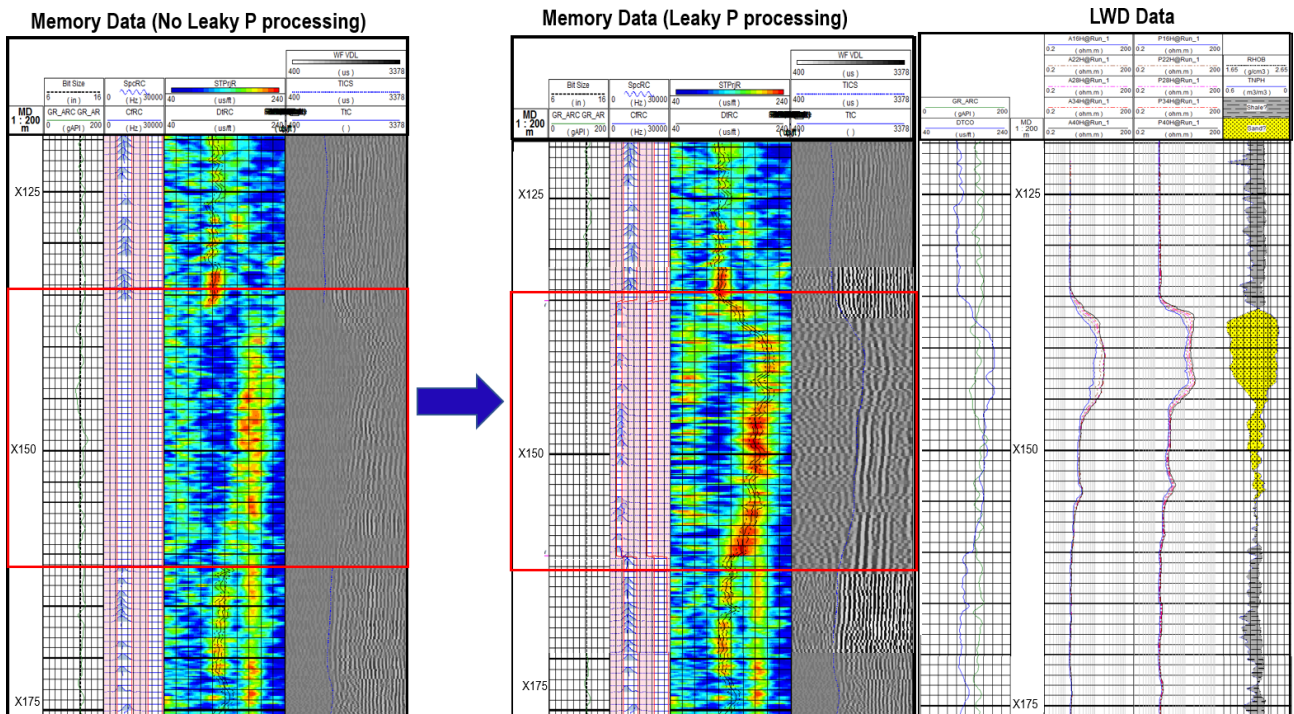


Figure 4. Gas effect on sonic data—Leaky P processing to get sonic slowness using memory data in slow formation
图 4. 气层段声波资料常规处理和泄漏模式纵波处理结果对比

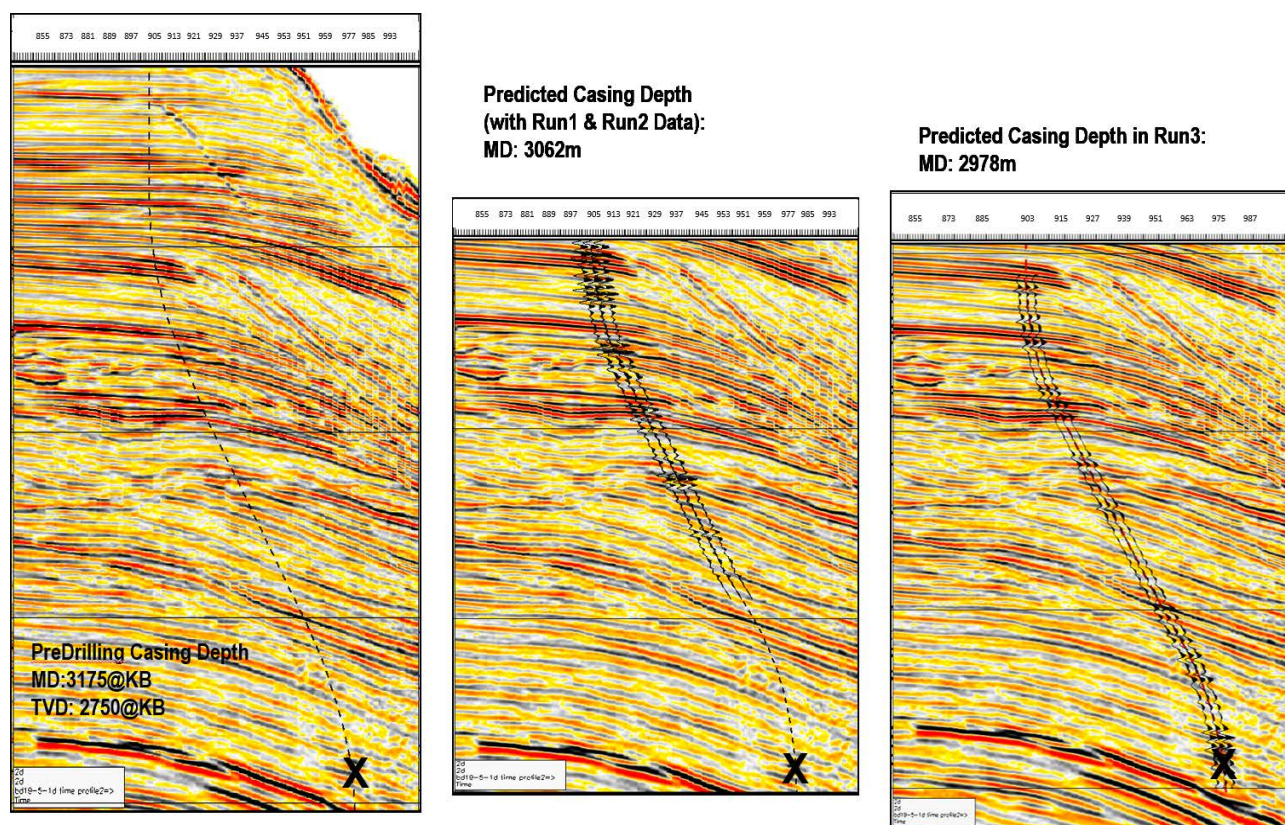


Figure 5. The final casing depth around 200 m above the plan depth based on Bit-on-Seismic prediction

图 5. 利用基于随钻四极子声波数据的井震标定结果优化套管下深

用该井采集的随钻测井实时声波数据，通过标定合成地震记录和地面地震剖面，建立了时间域和深度域之间的关系。在浅层可以看到少许的差异，但是随着深度增加差异越来越大。利用实时标定得到的时深曲线进一步优化 9-5/8 英寸套管位置，最终下至斜深 2978 m，比设计位置浅了约 200 m。图 5 所示的是钻前模型和更新模型后套管下放位置的预测深度。后续电缆 VSP 测井的标定结果进一步证实了套管下放位置的准确性，如图 6 所示。

3.3. 随钻压力监测

陵水 XX 气田第一口井钻前模型存在很大的不确定性，需要在随钻过程中利用随钻声波数据结合电阻率、伽马、密度以及地漏测试、录井等数据，实时计算监测孔隙压力和破裂压力。其中以随钻声波数据为主，因为声波对压力的变化较其他数据诸如电阻率等更为敏感，受其它因素如温度、地层水矿化度等影响较小，能更准确地对地层压力进行监测。

在钻井过程中，随钻压力监测进行 24 小时的全程跟踪。作业支持中心接收井场的随钻声波数据，实时监测井下压力并反馈回钻井现场。在实时监测井段上部，每 30 米报告一次孔隙压力和破裂压力；在井段中部和接近储层段时，频率加密到每 10 米、5 米汇报一次；在储层中每 3 米汇报一次。通过随钻压力监测，现场钻井作业部门获得准确的井下压力数据，为该井的安全完钻提供了技术保障。

图 7 为陵水 XX 气田 1 井实际作业过程中应用的最终孔隙压力监测模型，表 1 为随钻监测地层孔隙压力系数与实测结果对比。钻前预测与随钻监测结果存在一定的偏差。这种偏差尤其在勘探新区的预探井中更为突出，所以利用随钻压力监测数据可以有效地减小预测不确定性。实时孔隙压力监测结果与钻

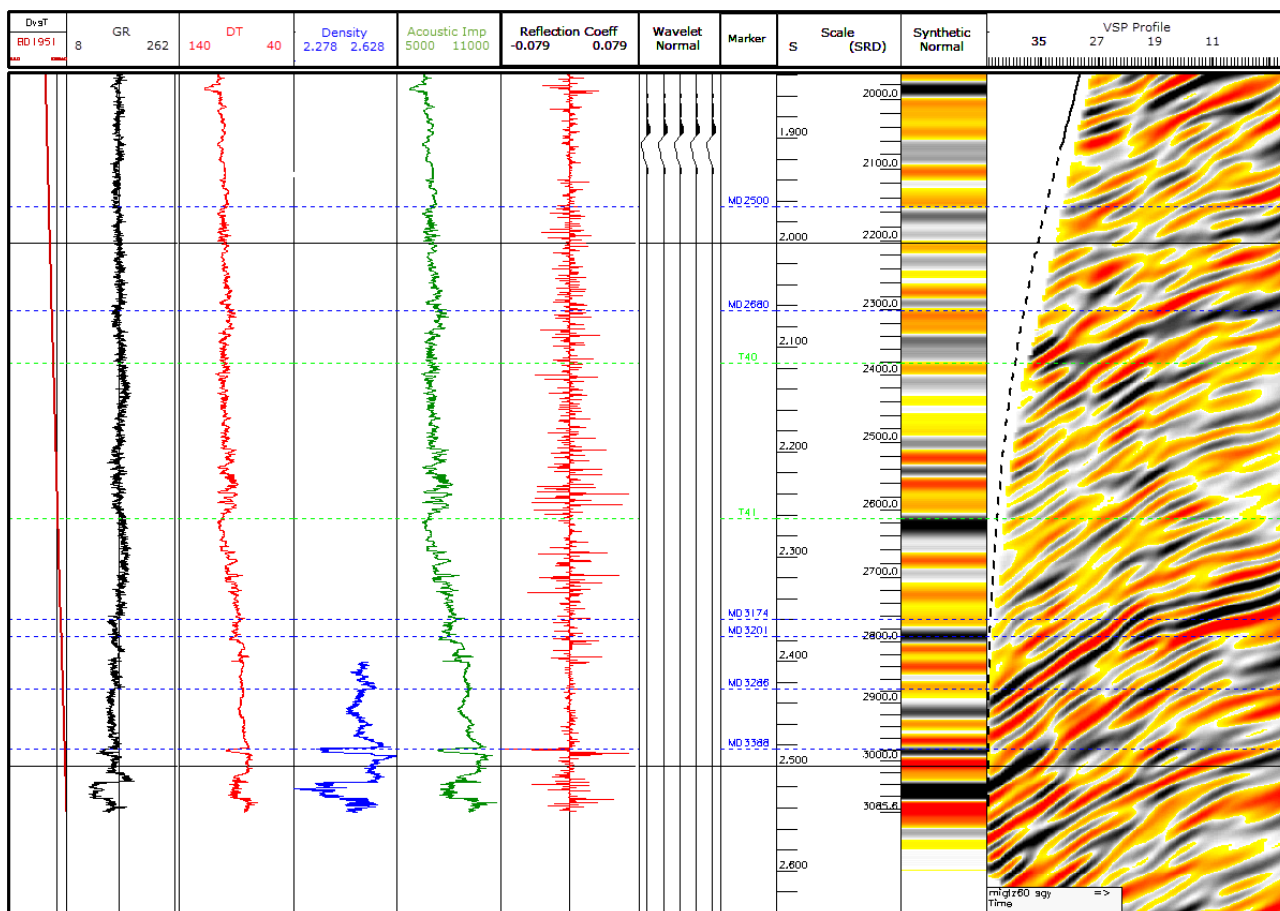


Figure 6. The wireline VSP data confirms the accuracy of casing depth prediction using real-time sonic data

图 6. 基于电缆 VSP 测井数据与随钻实时声波数据的地层标定结果一致

Table 1. The contrast of the real-time monitoring pore pressure and the direct pore pressure measurement results

表 1. 随钻监测地层孔隙压力系数与实测结果对比

地层层位	随钻监测结果	电缆地层测试结果	误差	备注
黄流组 I 段上	1.24	1.20	相差 0.04	含气影响计算孔隙压力略高
黄流组 I 段下	1.22	1.20	相差 0.02	含气影响计算孔隙压力略高
黄流组 II 段	1.19	1.19	符合	
黄流组 III 段	1.20	未测	-	
黄流组 IV 段	1.19	1.18	相差 0.01	

开砂岩段的孔隙压力实测结果相比，二者吻合很好，因此利用实时声波数据监测的孔隙压力结果完全能够用于指导实时钻井决策。

4. 结论与认识

在南海西部深水区陵水 XX 气田的钻探阶段，随钻多极子声波测井技术的应用实现了实时获取各种钻井环境与地层类型下的高质量全波列资料，实现了实时井震标定、优化套管程序、随钻孔隙压力和破裂压力的实时监测，拓宽了声波测井资料的应用范围，降低钻井风险，节约平台占用时间，优化了经济

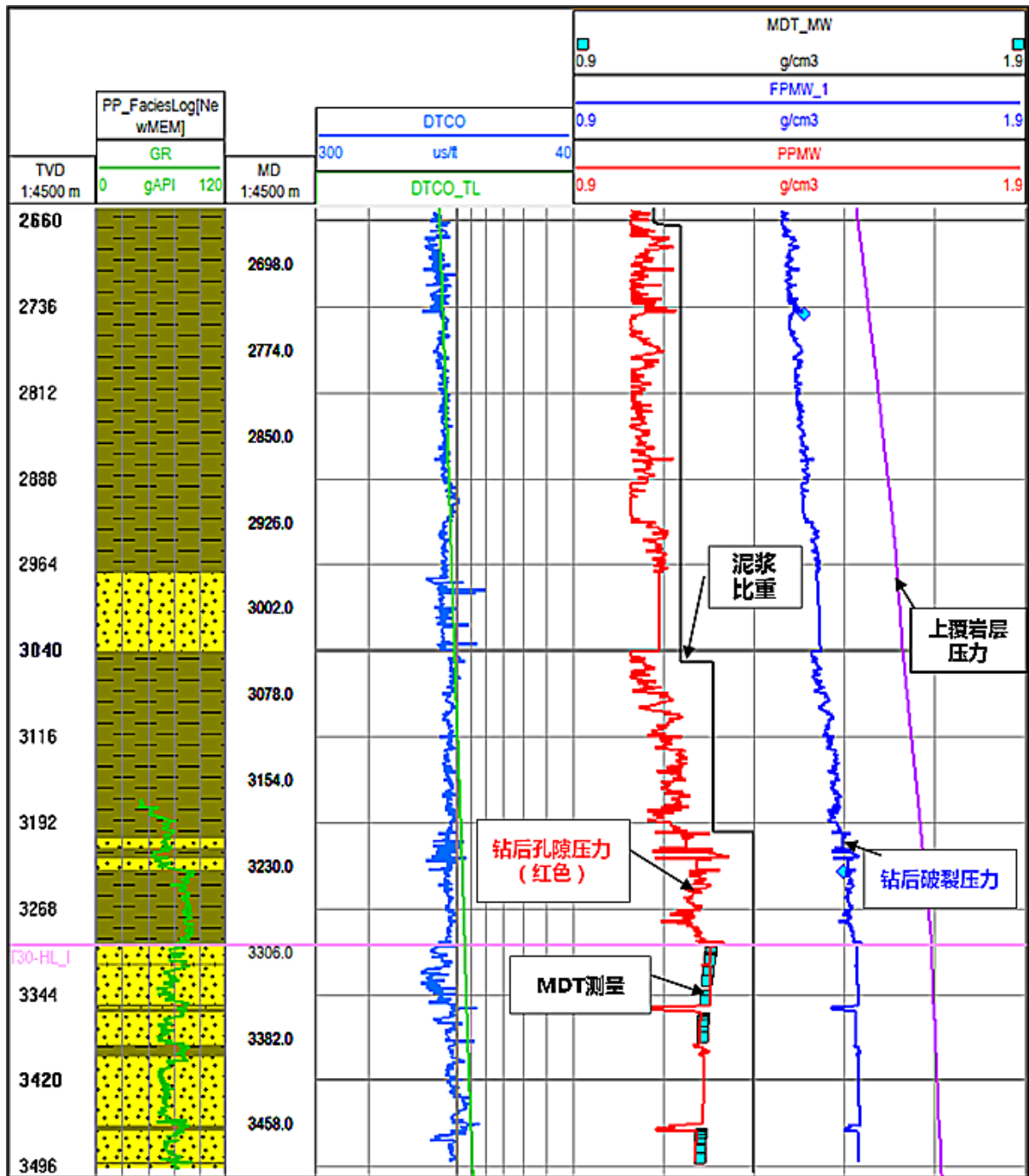


Figure 7. Final pore pressure model used for the real-time operation

图 7. 实际作业过程中应用的最终孔隙压力监测模型

效益，同时也对进一步开展声波实时数据的更多高级应用提供了基础。

1) 将实时声波测井资料综合应用到钻井、完井和评价流程中可以大大增加随钻声波测井技术的实用价值。可以实时进行岩石力学分析，优化钻井液密度选择和洗井程序，避免和减少井下复杂情况的发生；同时，有助于优化井身结构和套管下放位置，节约钻井成本。

2) 时效性是深水钻探的关键之一。通过运用随钻多极子声波测井技术，可以减少电缆声波测井时间，

规避电缆测井带来的作业风险，从而优化整体勘探经济效益。

3) 通过在陵水 XX 气田运用基于随钻四极子声波数据的实时压力监测技术，确保多口探井顺利完成，建立了适应本区块的压力模型和方法参数，为后续开发提供技术支持，证明了随钻四级子声波测井技术作为新技术在深水区应用的可靠性。

参考文献

- [1] 李中, 方满宗, 李磊. 南海西部深水钻井实践[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 93-95.
- [2] 杨进, 曹式敬. 深水石油钻井技术现状及发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(2): 16-19.
- [3] 王友华, 王文海, 蒋兴迅. 南海西部深水钻井作业面临的挑战和对策[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 50-55.
- [4] Bose, S., Valero, H.P. and Dumont, A. (2009) Semblance Criterion Modification to Incorporate Signal Energy Threshold. *SEG Technical Program Expanded Abstracts* 2009, 376-380. <https://doi.org/10.1190/1.3255652>
- [5] 王友华, 王文海, 蒋兴迅. 随钻声波测井研究进展[J]. 测井技术, 2009, 33(3): 198-202.
- [6] 乔文孝, 鞠晓东, 车小花, 等. 声波测井技术研究进展[J]. 测井技术, 2011, 35(1): 14-19.
- [7] 王华, 陶果, 张绪健. 随钻声波测井研究进展[J]. 测井技术, 2009, 33(3): 197-203.
- [8] 苏远大, 庄春喜, 唐晓明. 随钻声波测井钻铤模式波衰减规律研究与隔声体设计[J]. 地球物理学报, 2011, 54(9): 2419-2428.
- [9] Degrange, J.M., Hawthorn, A., Nakajima, H., Fujihara, T. and Mochida, M. (2010) Sonic While Drilling: Multipole Acoustic Tools for Multiple Answer. *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*, 2-4 February 2010, New Orleans, Louisiana, USA, SPE-128162-MS. <https://doi.org/10.2118/128162-MS>
- [10] Kinoshita, T., Endo, T., Nakajima, H., Yamamoto, H., Dumont, A. and Hawthorn, A. (2008) Next Generation LWD Sonic Tool. *The 14th Formation Evaluation Symposium of Japan*, 29-30 September 2008, JOGMEC-TRC, Chiba.
- [11] Wydrinski, R., Ramos, G.G., Weng, X. and Payne, M.L. (1998) Pore Pressure and Stress Gradient Prediction in Geo Pressured Formation, South China Sea. PRC. 1998 *SPE International Conference and Exhibition*, 2-6 November 1998, Beijing, SPE Paper 48883.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org