

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211677

# 过钻具声波仪水平井测井问题分析与解决方案

陶 钧 张炳军 白庆杰 刘炎昌 杜英伟 陈泉林  
(中国石油集团测井有限公司测井技术研究院 北京 102206)

**摘要:** 随着水平井钻完井技术的进步和规模化应用,过钻具存储式测井技术因其作业的高效性、安全性得以迅速发展,已经成为水平井的主体测井技术。测井仪器通过钻具水眼下入井底进行测井的特殊工艺和声波仪器的特殊结构,使得过钻具声波仪器在水平井测井中出现了新问题、新挑战。针对过钻具存储式声波仪器在现场应用中出现时差测量误差的各种现象进行总结,针对这些问题进行正演数值模拟和实验室物理模拟试验,明确了时差测量误差来源于在水平井和大斜度井仪器接收阵列与井壁不平行。提出了相应的仪器设计优化方案和基于杠杆原理的动态平衡施工工艺优化方案,并通过现场试验验证了优化方案的效果。可为过钻具声波测井仪器的研发和测量影响因素分析提供参考,对过钻具系统的推广应用和技术发展有重要的意义。

**关键词:** 过钻具;过钻头;声波测井;水平井;居中;动态平衡

**中图分类号:** P631.8<sup>+</sup>14 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 170.2035

## Problems and solutions of thru-drilling acoustic logging tool in horizontal well

Tao Jun Zhang Bingjun Bai Qingjie Liu Yanchang Du Yingwei Chen Quanlin  
(Technology Research Institute of CNLC, Beijing 102206, China)

**Abstract:** With the progress and large-scale application of the drilling and completion technique in horizontal well, the thru-drilling memory logging technology develops rapidly because of its efficiency and security. It has become the main logging technology in horizontal well. New problems and challenges appear in the horizontal well's field application of the thru-drilling acoustic logging tool because of the acoustic logging tool's special structure and the special process with which the logging tools go through the hole of the drilling tool into the bottom of the well. In this paper, the phenomenons of large slowness measurement error in the thru-drilling memory acoustic logging tool's field applications are summarized. In view of these problems, laboratory tests and forward simulation are carried out. Then we know that the reason of measurement error is that the receiving array is not parallel to the wall of the well in the horizontal well and the highly-deviated well. The corresponding optimization schemes of the tool design and the dynamic balancing logging process are proposed, which are based on the principle of leverage. The effect of the optimization schemes is verified through field tests. This paper can provide reference for the research and development of the thru-drilling acoustic logging tool and the analysis of the tool's measurement influence factors. This paper has important significance for the popularization, application and technological development of the thru-drilling system.

**Keywords:** thru-drilling tool; through bit; acoustic logging; the horizontal well; centralization; dynamic equilibrium

## 0 引 言

随着钻井技术的不断发展和油气勘探开发技术难度普遍增大,水平井已成为高效勘探的重要技术支撑,水平井在提高油田生产能力,增加储量和改善油田整体成本效率方面非常成功,因此许多作业者将水平井应用作为油藏管理策略的一个重要因素。水平井的应用领域和范围不断扩

大,数量也日益增多,水平井测井带来的问题也日益凸显。非常规油气的水平井具有井深大、水平段长、位垂比大、井眼情况相对恶劣等特点。采用传统的水平井测井工艺施工风险大,甚至无法完成生产任务。过钻具存储式测井系统施工工艺简洁,可靠性高,电缆泵送仪器入井,上提钻具存储测井,缩短了测井时间,降低了安全风险和成本,能够在井眼坍塌、页岩膨胀等复杂井眼条件下完成测井作业,在水

收稿日期:2022-10-12

平井施工中有独特的优势<sup>[1]</sup>,已经得到大量应用<sup>[2-4]</sup>,相关技术发展迅速<sup>[5]</sup>。

过钻具存储式测井系统由一套超小直径井下仪器和一套过钻具水眼作业的特殊工具组合而成。常见的过钻具存储式系统的仪器外径通常为 54、55、57、60 mm,仪器刚性外径尺寸越小,仪器过钻具水眼下井的通过性越好、适应性越高。声波测井不仅能够提供声波时差获得地层孔隙度,而且能够确定岩石力学参数、识别裂缝、进行渗透率估计、判断地层各向异性、评价压裂效果,是水平井的常测项目之一<sup>[6-10]</sup>。过钻具存储式声波测井仪器在储层评价和工程应用方面也取得了显著成果<sup>[6,9]</sup>。

本文通过大量的现场试验总结了过钻具存储式单极声波仪器在水平井测井应用中出现的时差测量误差偏大的特征和现象。较大的时差测量误差和不明确的误差来源成为制约过钻具声波测井仪器推广应用的主要障碍。本文通过实验室物理模拟实验和基于波动理论的正演模拟对过钻具声波仪器在水平井的测量现象进行复现和分析,明确了时差测量误差来源,明确了过钻具声波测井仪器水平测井的关键影响因素,提出了相应的仪器优化方案和施工工艺优化方案。不同于前人关于水平井声波时差测井响应特征研究<sup>[6,11]</sup>,在本文的研究中不考虑水平井和大斜度井井周地层各项异性、井眼轨迹、地层几何位置关系的影响,而是通过分析 and 总结过钻具声波仪器在水平井现场测井试验中出现的现象,通过基于声波波动理论的正演数值模拟和在实验室进行物理模拟试验复现测井现象、分析确认误差出现的原因,并在此基础上提出仪器设计优化方案和施工工艺优化方案,以此提高过钻具声波仪器的测井质量,并为解释工程师处理分析过钻具声波测井仪器水平井测井数据提供相应的依据。

本文阐述的过钻具声波测井仪器的现场试验、正演数值模拟和物理模拟试验现象和分析结论,明确了过钻具声波测井仪器的测量影响因素,填补了人们在水平井、大斜度井应用过钻具声波测井仪器时的认识空白,有助于过钻具声波测井仪器在水平井、大斜度井的推广应用。

## 1 过钻具声波测井仪器在水平井的现象

本文以单发五收的过钻具单极声波测井仪器为例进行分析。该仪器接收阵列中的接收器按照源距从小到大依次为 R1、R2、R3、R4、R5,最小源距为 3 ft,接收阵列间距 0.5 ft。仪器同时支持过钻具存储式测井和电缆测井两种模式。采集软件同时使用首波法和慢度-时间-相关系数(STC)算法对仪器数据进行实时处理,实时 STC 算法的应用为低信噪比下的时差提取提供了保障<sup>[12]</sup>。

该仪器在水平井或大斜度井测井时出现了以下实验现象:

1)在有些层段测量结果正确,但在有些层段时差偏大,有些层段时差又偏小。

2)在部分层段,使用 R1-R4 或者 R2-R5 参与时差计算相对于使用 R1-R5 进行计算,时差结果有整体变大或变小的趋势。过钻具存储式单极声波仪器在水平井的实验现象如图 1 所示。如图 1 第 3 道所示,去掉 R1 仅使用 R2-R5 波形计算所得时差比 5 个波形全部参与计算所得时差曲线整体偏小。如不使用 R3 波形仅使用 R1、R2、R4、R5 波形参与计算,在 STC 计算所得时差-相关系数谱上有时会出现两条相邻的轨迹,如图 1 最右侧一道所示。

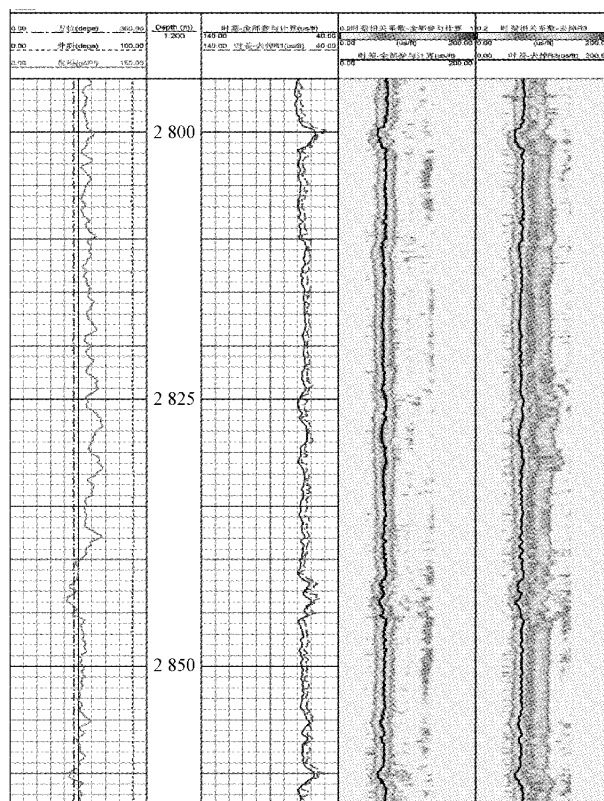


图 1 过钻具存储式单极声波仪器水平井实验现象

3)在同样井况或地层情况下,在水平段和大斜度井段相比常规井段原始波形的信噪比更低,时差曲线更容易产生跳尖,尤其在水平段页岩储层跳尖多发。

上述实验现象虽然是根据过钻具单极仪器的测井现象总结的,但是在过钻具偶极声波仪器的测井过程中也有类似现象出现。因此本文中分析的问题是过钻具声波测井仪器在水平井遇到的共性问题。

## 2 过钻具声波测井仪器在实验室的实验现象

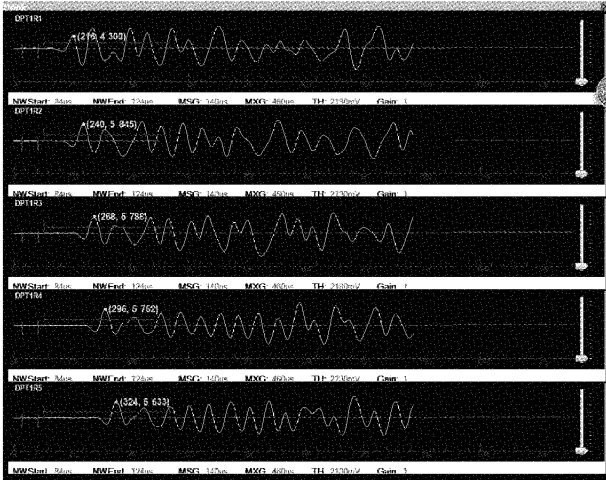
为了复现水平井测井时遇到的实验现象,在实验室进行实验。仪器水平放置两端支起时的状态如图 2 所示,仪器声系部分明显有弯曲现象,弯曲的最低点在发射和接收之间的隔声体靠近 R1 的地方,而这种现象在常见的 90 mm 外径的电缆测井仪器上并没有出现。由此可知,为适应过钻具测井系统的需求,仪器外径变小导致仪器变得更细更软,加上声波隔声体的设计通常需要在仪器外壳上镂空或

者变径设计,这就导致了过钻具声波仪器在水平放置或移动时声系弯曲。另一方面,过钻具声波仪器测井施工的时候只能使用在线扶正器扶正而无法使用套筒式扶正器,这种情况下两个在线扶正器之间的最小距离就由仪器的设计决定,这也给过钻具声波仪器在水平井的居中带来了挑战。

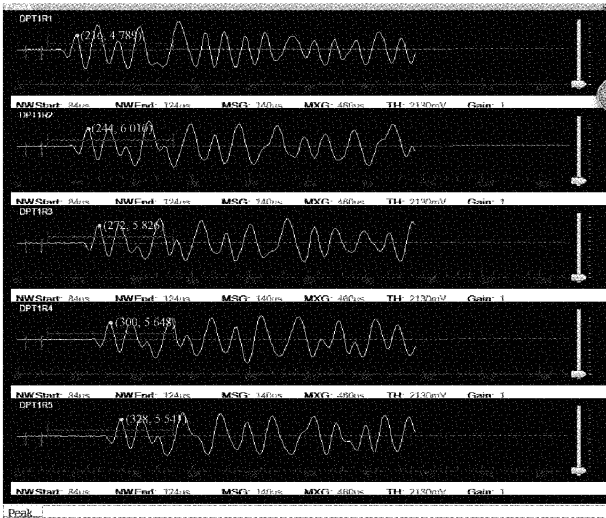


图 2 过钻具单极声波测井仪器水平放置状态图

实验在标定桶和半铝槽中进行,主要考察不同居中情况下测量得到的时差。标定桶中的实验都是在标定桶充满水后加压 3 MPa 进行的。实验步骤主要分为:1)整支仪器两端扶正在标定桶和半铝槽中测量;2)声系两头扶正在标定桶和半铝槽中测量;3)半铝槽中仪器不同位置加扶正测量。部分采集波形如图 3 所示;实验发现在接收阵列居中



(a) 仪器两头居中



(b) 声系两头居中

图 3 在标定桶中仪器不同位置居中采集到的波形

良好的情况下测量值最接近标准值。扶正装置加在仪器接收阵列两端时的时差测量误差明显小于扶正装置加在整只仪器两端时的时差测量误差,也就是说两个扶正器之间的距离对居中效果的影响与时差测量误差正相关。

上述实验现象初步证实水平井仪器弯曲造成了仪器声系与井壁不平行,违背了声波仪器地层时差的测量原理,导致了时差测量误差。如图 4 所示,当接收阵列与井壁不平行时,不同接收器接收到的声波在泥浆里的路程长度不同,泥浆的时差显著大于地层时差,在泥浆中的路程不同就导致了时差测量误差。

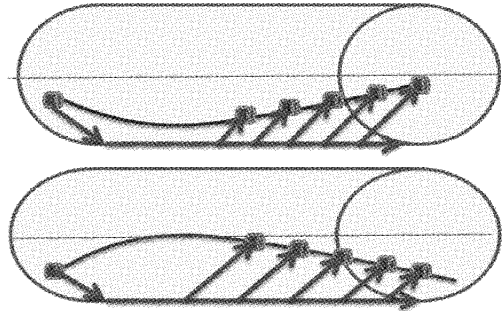


图 4 水平井仪器弯曲情况下纵波传播路径

### 3 正演模拟分析

因实验室实验时环境受限,无法复现全部井场遇到的现象。为了进一步复现井场测井现象,确认现象和问题原因的对应关系,进一步进行正演模拟计算。不同于以往考察声波测井偏心问题的研究<sup>[13-14]</sup>,本文中的正演计算忽略了因换能器不居中引起的影响,着重考虑因仪器不平行于井轴引起的测量误差。因此使用二维轴对称系统,通过改变换能器外径近似声系不平行的效果。正演模拟的基本模型如图 5 中实验 1 所示:二维轴对称系统中,仪器置于充液井孔中。井内液体为水。井外介质设置为不同性质的无限大地层或薄钢管(钢管壁厚 1 cm,钢管外是空气)。发射声源主频 15.5 kHz。井眼直径 20 cm。时间采样间隔 1 μs。本模型模拟的声系结构和第 1 节所述的单极声波仪器声系结构相同。假设接收阵列各个接收器在同一条直线上(黑色线段)。实验 1 假设接收阵列与井壁平行。

在实验 1 基础模型的基础上,首先通过正演模拟验证了发射器在小范围内的位置变化不影响时差测量。因此固定发射器位置,改变接收阵列与井壁的夹角,如图 5 中实验 2.1、实验 2.2、实验 3.1、实验 3.2 所示,计算不同参数设置下的波形和时差。实验 4.1、实验 4.2 试验了两个发射在接收阵列两侧对称发射时的情况以及接收阵列相对中心对称时的补偿情况。在每个模型中接收阵列与井壁的距离、夹角,发射器位置、采样间隔等参数也作为变量设置多个值计算其影响。

正演计算得到的波形计算前 3 个极值点到时和幅度,并通过到时计算时差,如图 6 所示。在不同模型所得的波



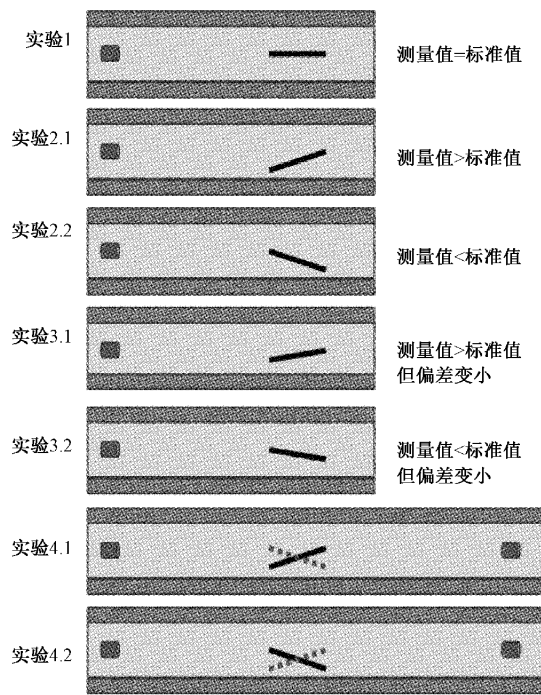


图 5 正演计算模型示意图

形阵列中选取不同的接收器组合计算首波时差,部分实验的结果数据如表 1 所示。在模拟计算所得同一个波形阵列中选取不同的接收器组合计算首波时差结果不同的现象与物理模拟试验现象相同。

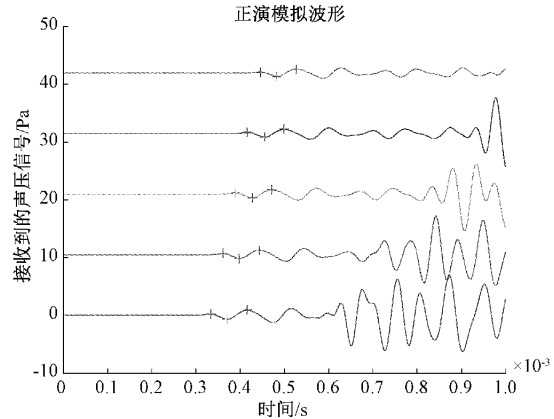


图 6 正演计算波形示例

通过大量正演计算实验得到如下结论:1)正演计算复现了测量值比标准值偏大或偏小的现象。如图 5 中实验 2.1 和实验 3.1 中的位置关系时,测量值大于标准值。如

表 1 部分实验不同接收器波形组合计算所得时差

| 时差( $\mu\text{s}/\text{ft}$ ) | 实验 1 | 实验 2.1 | 实验 2.2 | 实验 3.2 | 实验 4.1 | 实验 4.2 |
|-------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R1-R2 组合                      | 58.0 | 72.0   | 44.0   | 48.0   | 54.0   | 68.0   |
| R2-R3 组合                      | 56.0 | 68.0   | 44.0   | 50.0   | 52.0   | 68.0   |
| R3-R4 组合                      | 58.0 | 62.0   | 46.0   | 50.0   | 44.0   | 70.0   |
| R4-R5 组合                      | 56.0 | 58.0   | 44.0   | 50.0   | 42.0   | 68.0   |
| R1R2R3R4R5 组合                 | 57.0 | 65.0   | 44.6   | 49.6   | 48.0   | 68.6   |

图 5 中实验 2.2 和实验 3.2 中的位置关系时,测量值小于标准值;2)对正演计算得到的波形阵列计算时差复现了去掉 R5 使结果变大去掉 R1 使时差结果变小的现象。接收阵列与井壁之间的夹角大小、接收阵列与井壁的距离等参数的改变会导致接收阵列与井壁不平时去掉 R1 或 R5 时差测量值改变的现象有时出现但并非一直出现。不同参数情况下,去掉某个接收器所得测量值并不一定等于标准值,需要去除的接收器可能是 R1 也可能是 R5;3)两个发射器对称发射并不能补偿仪器弯曲造成不居中,相对于接收器中点对称的接收阵列能补偿但无法实现。

#### 4 施工工艺优化和仪器优化

通过实验室实验和正演计算实验复现了测井现场遇到的现象和问题,确认了在水平井测井遇到的时差测量值偏大或者偏小的问题根源在于重力引起的仪器弯曲造成的不居中。类似的情况也发生在大位移井的固井施工中<sup>[15-16]</sup>。这种不居中无法通过对称发射补偿,虽然在数据处理时去掉某个接收器有可能减小测量误差,但并非一个

安全且一直有效的操作。因此提出下述仪器优化和工艺优化使测井时仪器接收阵列尽量与井壁平行。

仪器优化方案:优化仪器设计,在声系两侧设计两个在线扶正器,尽量减小两个扶正器之间的长度。对于偶极声波仪器等长源距的仪器,可在发射和接收阵列中间再加一个扶正器,把隔声体和扶正器做一体化设计。缩短扶正器之间的距离可以有效提高扶正效果。同时优化仪器声系的隔声体和机械结构设计,可以有效提高仪器的硬度,降低仪器的弯曲程度。

通过把声系放置在两个扶正器之间,把电子线路放置在扶正器外侧,优化换能器尺寸和性能,并增加声系的机械强度对过钻具单极声波测井仪器进行优化,优化后的过钻具单极声波测井仪器水平放置时的状态如图 7 所示。优化后的仪器水平放置时声系能保持和地面平行,相对于图 2 所示现象,接收阵列与地面的平行位置关系明显改善。

挠度表征的是在受力或非均匀温度变化时,杆件的截面型心在垂直于轴线方向上的线位移。最大挠度与截面

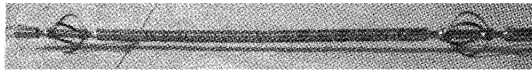


图 7 优化后过钻具单极声波测井仪器水平放置状态图

惯矩成反比。式(1)为圆柱状外壳的截面惯性矩的计算公式。

$$I = (D^4 - d^4)\pi/64 \quad (1)$$

式中: $I$ 为截面惯性矩; $D$ 为圆柱外径; $d$ 为圆柱内径; $\pi$ 为圆周率。式(1)说明过钻具系统中的圆柱状外壳的截面惯性矩主要受 $D$ 和 $d$ 影响,其中 $D$ 的大小由过钻具系统决定, $d$ 变化的空间也有限。式(1)说明了为什么上述实验现象在普通的电缆式声波测井中出现较少。挠度随轴向拉力的增大而减小,随轴向压力的增大而增大<sup>[15 16]</sup>。据此针对已经投产应用的仪器提出以下施工工艺优化方案。

施工工艺优化方案:使用支撑能力强的扶正器加在仪器两端,并在扶正器外侧加配重通过杠杆原理拉直仪器,在配重外侧加柔性降低仪器串其他部分对声波仪器的影响。这种基于杠杆原理的动态平衡平行井壁声波测井施工工艺优化能改善仪器在水平放置时的居中状态。将图 2 所示仪器两端加扶正器和配重后水平放置在地面,仪器与地面平行,如图 8 所示。虽然在现场实验时声波测井仪器是和其他仪器接成仪器串一起下井测量的,其他仪器也能对声波仪器起到纵向拉伸作用,但是因为上部和下部接的仪器不同,有的仪器还需要扶正器居中测量,这就导致仅依靠上下部连接仪器实现对声波测井仪器的拉伸效果不佳,进而出现了第 1 节所述的测井现象。下井前,当仪器串在地面连接后水平放置时,如发现声波仪器弯曲,通过在过钻具声波仪器两端加上配重和柔性,保证水平测井过程中仪器和井壁平行。



图 8 仪器加扶正器两端加配重后水平放置图

施工工艺优化后进行上井实验。通过多口井的实验发现,施工工艺优化后,时差测量误差明显减小。使用基于杠杆原理的动态平衡施工工艺进行水平井上井实验的测井结果如附录一所示。如附录一第 4 道所示,在水平段工艺优化后去掉 R1 或者 R5 得到的时差曲线相对于 R1~R5 全部参与计算所得时差曲线整体偏移的现象消失,时差测量误差明显减小。如附录一第 5 道所示,R1~R5 全部参与计算所得时差曲线与使用 R1~R4 所得时差曲线以及使用 R2~R5 所得时差曲线的差值,两条差值曲线没有明显的偏正或者偏负的现象。通过上井实验验证了配重+扶正器这种施工工艺优化的效果。通过增加配重优化扶正器不仅可以减小仪器声系弯曲、减小时差测量误差,同时可以减小仪器的刚蹭噪声,提高数据的信噪比,减少因刚蹭噪声产生的时差曲线跳尖,降低工程师数据处理的

劳动强度,提高工作时效和质量。

## 5 结 论

本文针对过钻具单极声波仪器在水平井测井的测井现象进行实验室实验和正演模拟计算。实验室实验和正演模拟计算复现了现场试验所出现的各个现象,确认了过钻具声波时差测量误差的来源,并提出了相应的仪器优化方案和基于杠杆原理的动态平衡平行井壁声波测井施工工艺优化方案。通过现场试验验证了在仪器两端加扶正器、配重的施工工艺优化方案的效果。本文所呈现的实验现象、实验结论和优化方案对过钻具声波仪器的设计开发、现场应用、数据分析处理以及过钻具测井系统的推广应用有重要的现实意义。

## 参 考 文 献

- [1] 郑宇生,占庆,赵长胜,等. 存储式钻具输送测井系统在油田的应用[J]. 石油工业计算机应用,2013,77(1): 51-52.
- [2] 毛英雄,杨小兵,阳大祥. 存储式测井在四川盆地页岩地层中的应用[J]. 天然气勘探与开发,2016, 39(1):23-26.
- [3] 黎泽刚,葛祥,徐炳高,等. 存储式测井技术在川西水平井中的应用[J]. 工程地球物理学报,2015, 12(4): 544-548.
- [4] 张炳军,曹孟鑫,李华锋,等. FITS 过钻具测井系统性能及应用效果评价[J]. 测井技术,2021, 45(6): 557-562.
- [5] 李江锋. 过钻具存储式测井工艺在施工过程中出现的问题及解决办法[J]. 石油仪器,2014,28(2):93-94.
- [6] 陈木银,何西攀,金小慧. 水平井声波时差测井响应特征研究[J]. 国外测井技术,2013(4):38-41.
- [7] LEE S Q, CHEN M, GU X H, 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.
- [8] YE Q, WANG B. Fracture evaluation using crossing dipole acoustic logging data in horizontal well[C]. 78th EAGE Conference and Exhibition 2016, 2016: 1-5.
- [9] 刘航,罗利,赵中明,等. ThruBit 偶极声波测井资料处理方法及应用[J]. 测井技术,2020,44(2):172-177.
- [10] 郭倩男. 基于声波测井的水平井压裂缝识别方法研究[D]. 成都:西南石油大学,2018.
- [11] 时建超,屈雪峰,雷启鸿,等. 致密油水平井声波时差测井影响因素分析及测井响应特征研究——以鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 储层为例[J]. 西北大学学报(自然科学版),2017,47(4):585-592.
- [12] 陶钧,肖加奇,鲍雪山,等. 阵列声波测井实时 STC 算

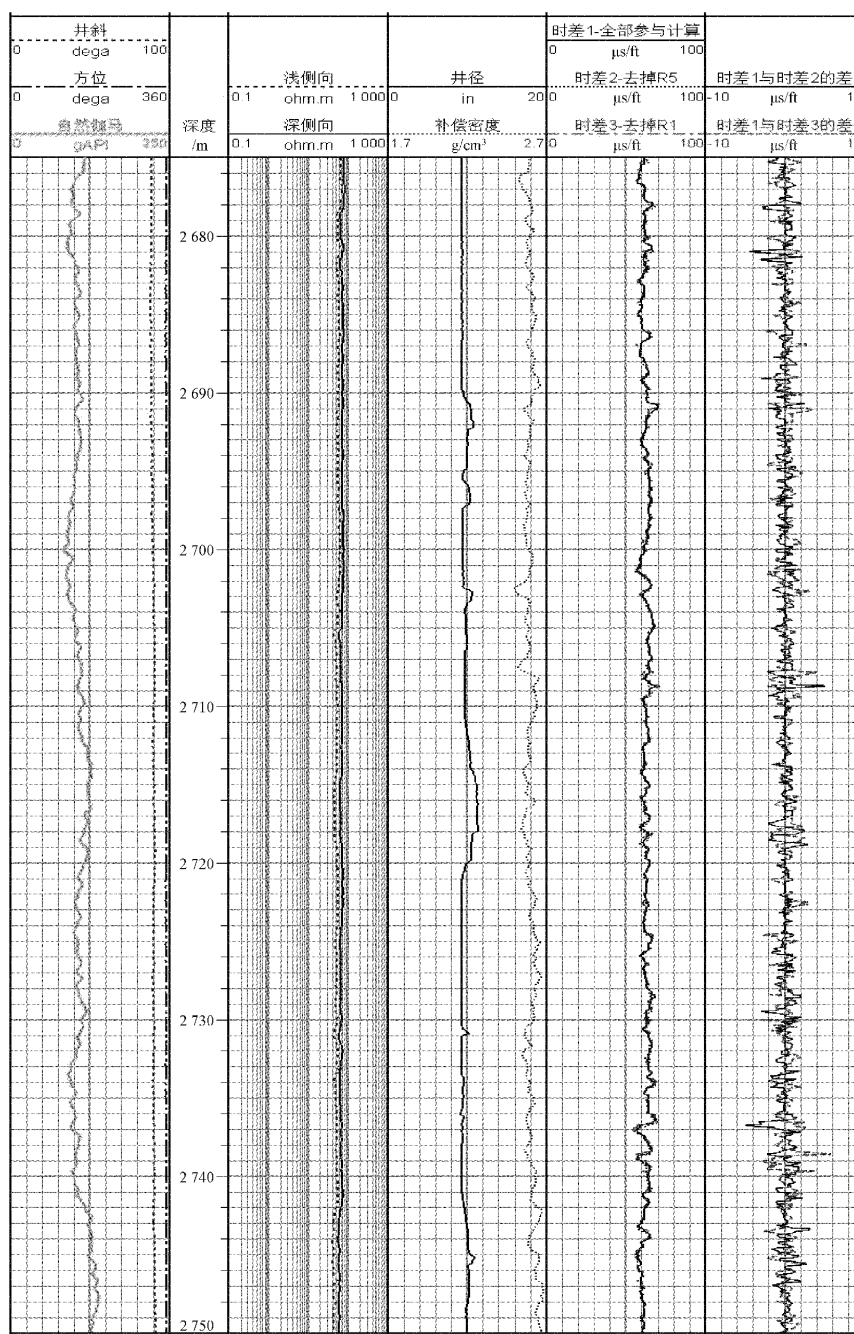
法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(1): 34-38, 44.  
 [13] 涂雨晴. 横向各项同性地层井孔多极源偏心时激发声场模拟[D]. 吉林: 吉林大学, 2017.  
 [14] LIU H, WANG B, TAO G, et al. Study on the simulation of acoustic logging measurements in horizontal and deviated wells [ J ]. Applied Geophysics, 2017, 14(3): 337-350.  
 [15] 孙铭新, 张大千, 步玉环, 等. 大位移井套管轴向力对

套管挠度的影响[J]. 石油矿场机械, 2014, 43(1): 7-10.  
 [16] 张大千. 大位移井、水平井套管扶正器安放位置优化设计[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.

作者简介

陶钧(通信作者), 硕士, 主要研究方向为声波测井仪器研发、声波测井方法研究等。  
 E-mail: 178592880@qq.com

附录



使用动态平衡施工工艺后的测井试验结果