

文章编号:1004-1338(2008)05-0394-04

国外随钻测井技术的最新进展及发展趋势

朱桂清, 章兆洪

(中国石油集团经济技术研究院, 北京 100011)

摘要: 介绍了国外测井公司近年来推出的多种随钻测井仪器的特点、结构组成及工作参数。主要包括低频四极横波测井仪器、宽频多极声波测井仪器、紧凑型补偿电磁波电阻率测井仪器、方位聚焦电阻率仪器、方位深电阻率传感器等。这些新仪器和技术的应用, 拓宽了测量范围、提高了测井数据的质量、节省了钻井时间和成本, 使得 LWD 测井数据在地质导向以及地层评价中发挥更重要的作用。

关键词: 随钻测井; 声波测井; 电阻率测井; 地层测试; 最新进展; 发展趋势

中图分类号: P631.84

文献标识码: A

Recent Advances in Foreign Logging While Drilling Technology

ZHU Gui-qing, ZHANG Zhao-qi

(CNPC Research Institute of Economics and Technology, Beijing 100011, China)

Abstract: Introduced are specialities, structures and parameters of some newly developed Logging While Drilling(LWD) tools used by eminent well logging companies in the past few years, such as quadrupole shear wave technology, multipole sonic tools, compact propagation resistivity tool, azimuthal focused resistivity sensor, azimuthal deep resistivity tool, etc. Recent development in LWD technologies and tools can extend measurement range, improve data quality and reduce rig time and cost. Newly advances in this field make LWD technology play more important role in directional drilling and formation evaluation.

Key words: Logging While Drilling(LWD), acoustic logging, resistivity logging, formation pressure test, recent advance, development trend

0 引 言

随钻声波测井仪器可以提供电缆测井质量的纵波和横波数据。贝克 INTEQ 公司的 LWD 低频四极横波仪器在低频时无需声隔离装置, 可以作为单极、偶极和四极仪器使用, 测量低速地层的横波数据; 哈里伯顿公司的 LWD 宽频多极声波测井仪器, 同时使用了单极、偶极和四极声源, 改善了数据质量并拓宽了横波测量范围。在 LWD 电阻率测井方面, 新仪器的设计更加紧凑, 测量深度逐步增加, 并且可以同时进行侧向和成像测量。此外, 第 2 代 LWD 地层压力测试系统具有自学习功能的优化测试程序, 并采用了智能化的极板控制。

1 国外几家大型测井公司最新推出的随钻测井仪器

1.1 LWD 低频四极横波测井仪器

近几年, 贝克休斯公司开始研发 LWD 四极横波技术^[1], 以便能够随钻测量地层横波速度。利用四极横波技术采集数据的优点是, 低频(低于 10 kHz)时因不存在仪器四极波, 因此无须声隔离装置; 此外, 低频时低速地层的四极波以地层横波速度传播, 因此可以测量低速地层的横波速度。

最初开发仪器的测量频率主要为 4 kHz 和 8 kHz, 为降低频散、改进四极横波测量, 贝克休斯公司又开发了在 2~3 kHz 或更低频率范围内测量

作者简介: 朱桂清, 女, 1962 年生, 高级工程师, 从事石油科技信息监测与研究工作的。

横波的四极技术。

随钻四极声波测井仪器最突出的特点是既可以作为单极声波仪器,又可以作为偶极和四极声波仪器使用,同时仪器的信噪比较高。

多极 LWD 声波测井仪器位于钻铤内,由 1 个发射器和 1 列接收器组成(见图 1)。发射器分为 4 个部分。当向发射器施加电脉冲时,每个部分在径向上向外膨胀或向内收缩,当 4 个部分同时膨胀或收缩时,将产生单极波。当将其作为偶极源时,相邻 2 部分收缩(膨胀),另 2 部分膨胀(收缩)。当作为四极源时,4 个部分分为 2 组,每组由 2 个相对部分组成,激发时,一对膨胀(收缩),另一对收缩(膨胀)。

在采集四极数据期间,2 对探测器分别探测正波和负波。对于每对接收器,2 个相关探测器的输出相加,得出该对接收器的信号输出。然后将 2 对接收器的输出相减,使信号幅度增加 1 倍(与单一接收器对比)。

新仪器的现场测试给出了良好的结果,说明通过提高低频段的信噪比,确实可以直接从 LWD 四极波中测量地层的横波速度,证实了低频 LWD 四极横波技术的可行性。

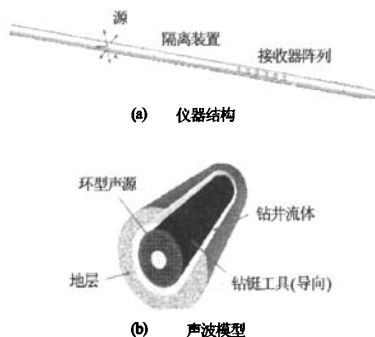


图 1 随钻四极横波测井仪器图

1.2 随钻宽频多极声波测井仪器

近 10 年来,随钻声波测井技术取得了巨大进步,目前在许多地层中都能提供高质量的纵波和横波数据,用于实时钻井决策。

为进一步提高随钻声波测井质量、扩展横波测量范围,哈里伯顿公司最新推出了随钻宽频多极声波测井仪器^[2]。新仪器是在偶极声波测井仪器基础上改进的,同时使用了单极、偶极和四极声源,能够在各种地层环境下采集高质量的声波数据,在较差的井眼环境下极大地提高了数据质量,并使横波

速度测量范围扩大 50%。

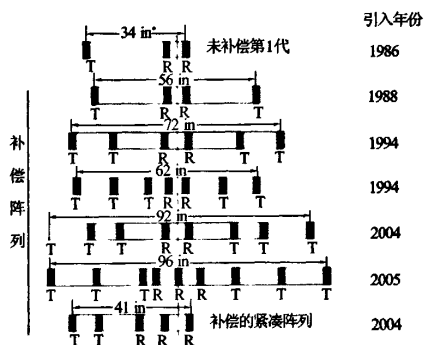
新仪器的优点:提高了数据存储能力,可以在更长的时间内记录高密度数据;扩展了测量频率,在 500 Hz 到 30 kHz 之间具有平缓的频率响应;配备了高灵敏度接收器和可编程宽频发射器,对地层信号更敏感,受钻井噪声的影响更小;新的声源组合具有更高的声波能量输出,声波极性和频率是可以选择的;采用新的频散追踪方法,降低了慢速横波测量的不确定性。

模拟结果和现场测试显示了新技术对声波测量的有效性。

1.3 紧凑型补偿随钻电阻率测井仪器

随钻电磁波电阻率测井仪器投入商业应用已经 20 多年了。第 1 代电磁波电阻率仪器比较简单,具有 1 个发射器和 2 个接收器,测量电磁波信号的相位差,提供一个电阻率值。近年来,随着电阻率测量技术的逐步成熟,仪器的测量参数也在增加,可以提供多个电阻率测量值,并且具有不同探测深度。

最近对 LWD 电磁波电阻率测井仪器的调查显示,原始的 3 根天线电磁波电阻率测井仪器已经发展为具有 9 根天线更复杂的系统(见图 2),现在具有 6~7 根天线的仪器很常见。



* 非法定计量单位,1 ft = 12 in = 0.304 8 m,下同

图 2 电磁波电阻率天线阵列的演化

最近,松代克斯公司推出了新的随钻电磁波电阻率测井仪器——紧凑型补偿电磁波电阻率测井仪器,新的仪器能够支持电磁波电阻率测井的基本要求:多个探测深度、井眼补偿、多个频率等^[3]。

新测量方法扭转了通过降低天线数量、增加长度和复杂性来满足井眼补偿等需要的趋势。新仪器的天线数量更多,长度更短,同时能完成多个频率测量。与传统天线阵列相比,紧凑天线阵列的长度缩短了 40%,这就降低了井底组合的长度和成本。

新仪器可以测量 3 个电阻率,能够确定地层真电阻率、侵入直径和冲洗带电阻率。与现有井眼补偿阵列设计相比,紧凑型的天线设计改善了侵入剖面 and 地层真电阻率的测量。

新阵列由 2 个发射器和 2 个接收器组成,以 2 个不同的发射器—接收器间距进行相位差和幅度衰减测量。常规的平衡阵列(2 个接收器位于 2 个发射器中间)只能以 1 个发射器—接收器间距进行测量,如果要以第 2 个发射器—接收器间距进行测量,必须增加 2 个发射器。

新阵列可以很容易地扩展,只要增加接收天线就可增加发射器—接收器间距并使相邻接收天线的间距与发射器天线的间距相同。基于这一概念开发的仪器具有 2 个发射器和 3 个接收器,以 3 个不同的发射器—接收器间距进行井眼补偿测量。等效的常规平衡阵列将需要 6 个发射器和 2 个接收器,仪器长度是紧凑型阵列仪器的近 2 倍。同时发射器工作时间增加 2 倍,测量速度更慢,消耗能量更高。

1.4 InSite ADR 方位深电阻率传感器

InSite ADR 传感器是哈里伯顿 Sperry 钻井服务公司最新推出的新一代随钻测井传感器之一。导向传感器和传统的多频补偿电阻率传感器结合在一起^[4]。1 个仪器能够提供 2 000 多个测量,用于精准的井眼定位和更精确的岩石物理分析。深读数、定向和高分辨率图像可以在钻头钻出目的层之前提供警示信息,使井眼保持在油藏的最高产位置,为优化井位布置、产量最大化和延长油田寿命提供了理想的解决方案。

InSite ADR 传感器的优点包括:专利设计准许在 32 个不连续的方向和 14 个探测深度上采集数据,确定多个地层界面的距离和方向;更大的探测深度,延长了反应时间,准许增加钻速,降低钻出油层的风险;仪器结合了全补偿电阻率测量和深读数地质导向测量,减小底部钻具组合长度。

InSite ADR 传感器是 Sperry 公司新一代随钻测井传感器,使用了先进的小型化技术,极大地减少了元件数量,同时明显提高了处理能力。

InSite 传感器具有更深读数;更高分辨率;更快的数据传输——通过数据压缩,自定义数据流以及 IntelliServ 网络全兼容来实现;更高的可靠性——通过元件一体化处理,减少了电接触点。

使用 InSite 随钻测井传感器比使用以前的仪器可以更好地了解地层。InSite ADR 传感器在仪器四周 32 个不连续的方向上以不同的探测深度采集

数据。其较大的探测深度有助于及早了解岩性和地质构造变化,当存在地震测量无法探测到的小型交叉断层时,多深度测量能够描述不同的地层,并进行断层两侧的地层对比。当作为 StrataSteer 3D 地质导向服务使用时,InSite ADR 传感器可以充分发挥作用。

1.5 方位聚焦电阻率仪器

电阻率井眼成像测井是现代地层评价的基本需求,特别是在大斜度/水平井或复杂地质环境。水泥浆随钻测井是很有吸引力的电阻率成像测井方法,因钻柱旋转和极低的机械钻速有利于均匀的方位覆盖和高密度采样。

现有的电阻率测井仪器分为侧向测量和成像测量,侧向测量进行中等探测深度的补偿电阻率测量,而成像测量的探测深度非常浅,是非补偿的。在近水平井段,厚 2 ft 的高电阻率层段在测井曲线上可能显示出近 20 ft 厚,侧向测井很难指示这种地层的存在。而电阻率成像测井极易探测到这样的地层,但非补偿测量会受到泥浆侵入或仪器与井壁间隙的影响,无法提供准确的地层电阻率值。

哈里伯顿公司新研制的方位聚焦电阻率 (AFR) 仪器,将电阻率成像和随钻侧向测井结合在一起,提供以下 3 种测量^[4]:单向侧向测井电阻率数据;地层电阻率图像;钻头处电阻率测量。

近期,哈里伯顿公司将推出可变的和混合分辨率的仪器。因仪器的接收器部分很容易更换,在不影响仪器其他部分的前提下可对仪器进行改造和升级。此外,还将进一步改善钻头处电阻率测量。

在美国大陆、阿拉斯加和中东地区对 AFR 仪器进行了现场测试。目前有 2 种尺寸的仪器可以利用,4 $\frac{3}{4}$ in 和 6 $\frac{3}{4}$ in。仪器长约 10 ft,相对比较紧凑。有 3 个标称探测深度:3、7 in 和 11 in,方位和成像分辨率为 0.5~1.5 in。

1.6 第 2 代 LWD 地层压力测试技术

随着致密低渗地层压力测试需求的增加以及相关技术的快速发展,贝克 INTEQ 公司推出了第 2 代 LWD 地层压力测试系统。新系统可以在 5 $\frac{3}{4}$ ~17 $\frac{1}{2}$ in 的井眼中采集压力数据,解决了在致密地层、未固结砂岩以及容积式马达等钻井环境下达到并保持有效密封、采集高质量数据的难题^[5]。

与第 1 代系统相比,第 2 代系统从以下 2 个方面进行了技术改进。

(1) 具有自学习功能的优化测试程序 (Smart-Test),提高了压力和流量数据的测量精度。此外,

智能测试还降低了致密地层测试中遇到的震动效应,避免了高度未固结地层的出砂问题。

(2) 智能化的极板控制(SmartPad),允许单独或连续控制测试周期。智能化的闭环极板压力控制优化了密封效率,节省大量因密封失效需要的重复测试时间,避免地层损害。SmartPad的采用使密封成功率从83%提高到97%。

因LWD环境下泥浆脉冲数据传输率有限,第2代LWD压力测试技术采用了智能井下系统,可以根据压降、最低测试时间来优化测试程序,并自动对数据质量进行有效评估,有助于降低测试时间,避免钻杆遇卡。减少测试时间意味着节省钻机时间和成本,并能保障井眼安全。为了进一步增加井眼安全性,测试期间可以保持泥浆循环。

挪威国家石油公司在Heidrun和Oseberg West Flank油田使用了新的测试系统,证实了密封效果。在很宽的流量范围内,密封成功率接近100%。

2 随钻测井技术发展趋势

为更好地研发新一代随钻测井系统,斯伦贝谢公司通过网络对岩石物理、油藏、钻井以及地质/地球物理人员进行了调查。调查的内容是他们对随钻测井中的哪些工程问题比较关注,以及对各种问题的关注程度如何。调查发现,人们对随钻测井所关注的问题依次是测量点到钻头的距离、数据传输率、仪器的可靠性和放射性源等。

(1) 减小测井传感器到钻头的距离。对于客户来说,最关心的是测量点到钻头的距离。因此,在新仪器设计时需要解决仪器长度和传感器组合问题。

(2) 提高实时数据传输率。数据传输对于随钻测井技术的发展至关重要,可以通过几种途径提高数据传输率:① 井下数据处理,提取需要的信息,只传输地面计算急需的数据;② 井下数据优化;③ 通过钻杆埋缆等方式,实现有线数据传输;④ 提高泥浆脉冲数据传输率。

(3) 提高测井传感器的可靠性。随钻测井直接影响到钻井过程,任何仪器故障都将对钻井成本产生直接重大的影响,因此测井传感器的可靠性要进一步提高。

(4) 提高作业的安全性。为了提高作业的安全性,需要消除放射性化学源,用脉冲中子发生器取而代之。这样在仪器运输和测井过程中避免了可能的

放射性污染。

3 结 论

随钻测井技术的发展,使得LWD声波测井仪器的测量范围进一步扩大、LWD电阻率仪器的探测深度增加。新推出的LWD声波测井仪器能够在各种地层环境下采集高质量的声波数据,扩大了横波测量范围。新的电阻率测井仪器可以提供定向和高分辨率的图像,用于精准的井眼定位和更精确的岩石物理分析。第2代随钻地层测试系统解决了在致密地层、未固结砂岩以及容积式马达等钻井环境下达到并保持有效密封、采集高质量数据的难题。

在今后的发展中,人们将更多地关注测量点到钻头的距离、数据传输率、仪器的可靠性和放射性源等问题。随着这些指标的改善,随钻测井资料的应用范围在逐步扩大,据报道,2006年随钻测井在地层评价数据采集中所占比例超过了1/3,其应用还在继续增长^[6]。

参考文献:

- [1] Tang X M, Dubinsky V. Development of A Low-frequency Quadrupole Shear-wave Technology to Improve Quality of LWD Shear Velocity Measurement [C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2006.
- [2] Market Jennifer. New Broad Frequency LWD Multipole Tool Provides High Quality Compressional and Shear Data in A Wide Variety of Formations [C]// SPWLA 48th Annual Logging Symposium, 2007.
- [3] Macune D T, Flanagan W D, Choi E, et al. A Compact Compensated Resistivity Tool for Logging While Drilling [C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2006.
- [4] Prenskey Stephen. Recent Advances in Well Logging and Formation Evaluation [J]. World Oil, 2008, 229 (3): 89-94.
- [5] Gravem Trond. Second Generation of LWD Formation Pressure Testing Technology Improves Data Quality, Increases Sealing Efficiency and Shortens Test Time [C]// SPWLA 47th Annual Logging Symposium, 2006.
- [6] Lofts Jeremy. The History, Contribution and Value Proposition of Logging While Drilling (LWD) [J]. Petrophysics, 2007, 48(12): 434-435.

(收稿日期:2008-05-23 本文编辑 王小宁)