



随钻测控技术现状及发展趋势

王延文 叶海超

Current Status and Development Trend of Measurement & Control while Drilling Technology

WANG Yanwen, YE Haichao

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024017>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

智能钻井技术研究现状及发展趋势

Intelligent Drilling Technology Research Status and Development Trends

石油钻探技术. 2020, 48(1): 1-8 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020001>

国内外地下储库现状及工程技术发展趋势

Present State of Underground Storage and Development Trends in Engineering Technologies at Home and Abroad

石油钻探技术. 2017, 45(4): 8-14 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201704002>

国内非常规油气录井技术进展及发展趋势

Technical Progress and Developing Trends in Unconventional Oil and Gas Mud Logging in China

石油钻探技术. 2017, 45(6): 1-7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201706001>

随钻一体化测井仪平台开发

The Development of an Integrated Logging Instrument Platform while Drilling

石油钻探技术. 2019, 47(1): 118-126 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019016>

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>

气体钻井MMWD随钻测量方法研究

Research on Measurement Methods of MMWD during Gas Drilling

石油钻探技术. 2018, 46(5): 52-56 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018055>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2024017

引用格式: 王延文, 叶海超. 随钻测控技术现状及发展趋势 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(1): 122-129.

WANG Yanwen, YE Haichao. Current status and development trend of measurement & control while drilling technology [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(1): 122-129.

随钻测控技术现状及发展趋势

王延文¹, 叶海超²

(1. 中石化石油工程技术服务有限公司, 北京 100020; 2. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206)

摘 要: 随钻测控技术是随钻测量、随钻测井和随钻控制的统称, 是当今石油工程高端技术的代表, 也是自动化智能化钻井的核心。随钻测控技术的发展为油气勘探开发提供了重要利器, 大幅提高了作业效率, 降低了作业成本和油气综合开发成本。全面梳理了斯伦贝谢、贝克休斯和哈里伯顿等国际大型油服公司随钻测控技术的发展现状, 分析了油气勘探开发对随钻测控技术的需求, 厘清了随钻测控技术的发展方向, 提出了中国随钻测控技术的发展建议, 凝炼了随钻测控技术的发展重点, 以期推进我国随钻测控技术的快速发展, 提升随钻测控技术水平。

关键词: 油气; 随钻测量; 随钻测井; 随钻测控; 旋转导向; 发展趋势

中图分类号: TE927 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2024)01-0122-08

Current Status and Development Trend of Measurement & Control while Drilling Technology

WANG Yanwen¹, YE Haichao²

(1. Sinopec Oilfield Service Corporation, Beijing, 100020, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing, 102206, China)

Abstract: Measurement & control while drilling technology is a broad term for measurement while drilling, logging while drilling, and control while drilling. It represents high-end technologies in petroleum engineering and forms the core of automated and intelligent drilling. The evolution of measurement & control while drilling technology has provided an important tool for oil & gas exploration and development, significantly enhancing operational efficiency and reducing operational cost and comprehensive oil & gas costs. This paper offers a comprehensive review of the research progress in measurement & control while drilling technology within major international oil service companies such as Schlumberger, Baker Hughes, and Halliburton. It analyzes the demand for measurement & control while drilling technology in oil & gas exploration and development. Furthermore, the development direction of measurement & control while drilling technology was clarified, and suggestions on the development of measurement & control while drilling technology in China were put forward. Finally, the development focus of measurement & control while drilling technology was summarized, so as to promote the rapid development of measurement & control while drilling technology in China and elevate the overall standard of measurement & control while drilling technology.

Key words: oil & gas; measurement while drilling; logging while drilling; measurement & control while drilling; rotary steering; development trend

随钻测控技术是利用测量、传输、控制等手段引导钻头沿着目标轨道钻进的综合技术, 是石油工程高端技术的代表, 被称为“钻井(石油工程)技术皇冠上的明珠”, 其发展推动了定向钻井从几何导

向到地质导向、智能导向的跨越, 大幅度提高了钻井效率, 降低了钻井和油气开发综合成本, 为油气高效勘探和经济开发提供了重要利器。随钻测控技术主要包括随钻测量、随钻测井和随钻控制等技

收稿日期: 2023-11-07; 改回日期: 2023-12-25。

作者简介: 王延文(1969—), 男, 山东烟台人, 1992年毕业于石油大学(华东)钻井工程专业, 2002年获石油大学石油与天然气工程专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事石油工程科技研发与管理工作。E-mail: wangyw.os@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“面向2035年的新型钻完井技术发展策略研究”(编号: P20031)资助。

术,其中,随钻测量技术主要是在钻井过程中实时测量井斜角、方位角、工具面角等工程参数,确定井下状态,判断井下风险,优化地质目标和工程方案,为随钻测井和旋转导向提供一个数据传输的平台;随钻测井技术是沿井身测量地层的各种物理参数,判定地下岩石流体的物理性质与渗流特性,寻找和评价油气层,为优化井眼轨迹,使钻头朝着最利于油气开发方向钻进的综合技术;随钻控制技术是在井下钻柱旋转过程中实时对钻头空间轨迹导向的一种先进钻井技术,以斯伦贝谢、贝克休斯等为代表的国际油服公司引领着该技术的发展,其生产的旋转导向钻井系统占据着市场的绝对优势。近年来,我国高度重视随钻测控技术的研发,取得了很多成果,但与国外先进水平相比还存在较大差距。为推动我国随钻测控技术发展,笔者梳理了随钻测控技术的发展现状,厘清了技术发展趋势,并提出了发展建议。

1 随钻测控技术发展现状

近几年,随钻测控技术发展迅速,国外随钻测量技术(MWD)已实现高速连续波脉冲传输、电磁波传输及组合化传输,6 000 m 深井传输速率达 20 b/s,耐温达 200 ℃;随钻测井技术(LWD)已实现近钻头、远探测、前探测、成像、无源多功能、地层流动成像等,远探测距离达 30~60 m、前探测距离达 15 m、成像分辨率 5 mm,耐温达 175 ℃;旋转导向系统(RSS)已实现高造斜、近钻头、低成本,耐温达 200 ℃,造斜率达 18°/30 m,并研发了全机械旋转导向系统,大幅提高了可靠性,降低了应用成本。

1.1 随钻测量(MWD)技术

斯伦贝谢、贝克休斯和哈里伯顿等国际大型油服公司一直引领着随钻测量(MWD)技术的发展,形成了比较成熟的钻井液脉冲、电磁波和智能钻杆等 3 种传输测量信号的系列随钻测量仪器。目前,耐温 150 ℃、传输速率 10 b/s 的钻井液脉冲和电磁波传输测量数据的随钻测量仪器占据了较大的市场份额。迭代升级的 200 ℃/207 MPa 高温高压脉冲随钻测量仪、传输速率 36 b/s 的连续波脉冲高速传输随钻测量仪、双信道随钻传输随钻测量仪及数据传输压缩平台等,垄断了 90% 以上的国际市场。

1.1.1 钻井液脉冲随钻测量技术

钻井液脉冲随钻测量技术主要包括正脉冲随钻测量技术和连续波脉冲随钻测量技术。目前,正脉

冲随钻测量技术已形成成熟的耐温 175 ℃ 的钻井液脉冲随钻测量仪器,并进行了现场应用,主要产品有斯伦贝谢的 Slimpulse 随钻测量仪器、哈里伯顿的 Solar175 系列随钻测量仪器、威德福的 HeatWave 系列随钻测量仪器和贝克休斯的 NaviTrak 系列随钻测量仪器。此外,APS、NOV、Enteq Upstream 和 Nabors 公司也都拥有相应的产品。而耐温 200 ℃ 的随钻测量仪器还不完全成熟,仅斯伦贝谢、哈里伯顿和威德福等公司研制成功,其他公司正在进行研发和试验。

连续波钻井液脉冲的传输速率最大可达到每秒几十位,与电磁波相比,传输深度不受地层电阻率限制,是目前解决深井、超深井高速传输测量信号问题的主要技术手段。目前仅有斯伦贝谢、贝克休斯和哈里伯顿公司掌握该技术和拥有相关产品,如,斯伦贝谢 Power Pulse 随钻测量仪测量信号的传输速率最高可达到 16 b/s;贝克休斯 aXcelerate 随钻测量系统测量信号的传输速率为 20 b/s,最高可达到 40 b/s;哈里伯顿 QuickPulse 随钻测量系统工具面角的更新时间为 3 s,数据帧整体的更新时间为 24 s^[1]。

1.1.2 电磁波随钻测量技术

国外油服企业和技术公司均已推出成熟的电磁波随钻测量仪器。斯伦贝谢的 E-Pulse XR 电磁波随钻测量仪器耐温 150 ℃,耐压 137 MPa,测量信号的最大传输速率 12 b/s,有 $\phi 120.7$ 和 $\phi 165.1$ mm 等 2 种规格;哈里伯顿的 EMT-MWD 耐温 150 ℃,耐压 125 MPa,测量信号的最大传输速率 10 b/s,适用深度 2 000~3 000 m;国民油井华高公司的 BlackStar 电磁波随钻测量仪耐温 150 ℃,耐压 137 MPa,能够测量井斜角、方位角、工具面角、磁倾角等定向数据,测量信号的最大传输速率 6 b/s,有 $\phi 203.2$ 、 $\phi 120.7$ 、 $\phi 165.1$ 和 $\phi 95.3$ mm 等 4 种规格;俄罗斯 VNIIGIS 公司的 ZTS-MWD 电磁波随钻测量仪耐温 120 ℃,耐压 60 MPa,能够测量井斜角、方位角、工具面角、钻头载荷、近钻头伽马和振动等参数,测量信号的最大传输速率 6 b/s,有 $\phi 118.9$ 和 $\phi 149.9$ mm 等 2 种规格^[2]。

1.1.3 双信道一体化随钻测量技术

斯伦贝谢和国民油井华高公司的双信道一体化随钻测量仪器已实现商业化。2018 年,斯伦贝谢先推出的 xBolt 双信道随钻测量仪器耐温 165 ℃,耐压 137 MPa,电磁波和脉冲的最大传输速率分别为 16 和 4 b/s,信道切换时间 60 s,有 $\phi 120.7$ 、 $\phi 165.1$ 和 $\phi 203.2$ mm 等 3 种规格^[3]。国民油井华高公司推出的 BlackStar II 双信道随钻测量仪器耐温 150 ℃,耐

压 137 MPa, 可以测量井斜角、方位角、工具面角、自然伽马、方位伽马、环空压力、振动、转速等参数, 电磁波和脉冲的最大传输速率分别为 6 和 3 b/s^[4-6]。

1.1.4 高速随钻测量平台

智能钻杆采用高频磁耦合有缆钻杆提高随钻测量信号的传输速率, 理论传输速率可达 1~2 Mb/s。IntelliPipe 公司推出了全球首个商业化智能钻杆系统, 在此基础上推出了 eVolve 钻井参数优化服务, 通讯速率高达 57 kb/s, 可在钻杆沿线设置多个中继器对扭矩、拉力、振动等井筒工程参数进行分布式测量, 目前已累计作业超过 6 000 h, 累计进尺超过 54 000 m^[7]。

斯伦贝谢研发的 Orion II 数据传输压缩平台可将井下实时数据打包, 传送至地面解压显示, 传输速率提高了 1~2 倍, 具有良好的地面抗噪解码能力, 有效提高了井筒实时曲线、图像、波形的质量和精度, 可以在 76.2 m/h 的机械钻速下以每米 6 个数据点的速度更新, 同时提供 60 条实时监测曲线。在井深 12 290 m 的超深井中, 该平台创造了井深 10 668m 以浅井段传输速率 3 b/s、1 0668~1 2290 m 井段传输速率 1.5 b/s 的随钻测量信号最深传输纪录^[8]。

1.2 随钻测井 (LWD) 技术

斯伦贝谢、贝克休斯、哈里伯顿等公司均开发了具有远探测、前探测能力的系列成套随钻测井装备, 实现了高精度成像、远探测、前探测、无源集成化多参数、随钻地层测试等。

1.2.1 随钻高精度成像技术

为满足复杂储层地质导向需求, 各大油服公司相继开展了近钻头伽马成像技术研究, 并研制近钻头伽马成像测井仪。斯伦贝谢的近钻头伽马成像测井仪 IPZIG 能够实现 8 扇区实时测量、16 扇区伽马成像数据存储, 伽马测点距钻头 0.42 m, 方位角和井斜角的测点距钻头 0.70 m。贝克休斯 ZoneTrak G 近钻头伽马成像测井仪的伽马测点距钻头 0.64 m, 哈里伯顿 AGR 近钻头伽马成像测井仪的伽马测点距钻头 0.45m, 同样能实现 8 扇区实时测量、16 扇区伽马成像数据存储。

随钻高分辨电阻率成像测井仪能够评价地层构造、识别断层和裂缝。斯伦贝谢第三代 MicroScope & MicroScope HD 随钻高分辨电阻率成像测井仪提供 4 个探测深度的侧向电阻率和井眼成像图, 成像电极测量范围 0.1~1 000.0 $\Omega \cdot m$, 128 扇区成像, 分辨率达 10 mm。哈里伯顿方位聚焦电阻率测井仪 AFR 的成像分辨率为 25.4 mm, 128 扇区成像。贝克休斯

的 StarTrak 随钻高分辨率成像测井仪的成像分辨率为 12.7 mm, 120 扇区成像。

随钻超声成像技术已实现井壁超声反射波到时间和幅度二维井筒成像、三维可视化井眼结构成像, 可以进行井壁裂缝识别、井眼几何形态评价和原始地应力分析。斯伦贝谢的 TerraSphere 随钻超声成像测井仪集超声和电阻率测量于一体, 能够满足油基钻井液高精度成像需求, 实现 256 扇区成像, 分辨率达 5 mm。贝克休斯和哈里伯顿也分别推出了高分辨率随钻井壁超声成像测井仪 Imager Trak 和 PixStar^[9-14]。

1.2.2 随钻远探测/前探测技术

目前, 随钻电磁波电阻率测井仪已发展到第三代, 能够实现双频多发双收并实现了系列化, 可提供多条径向探测深度不同的电阻率曲线, 最大探测界面距离 2 m, 如斯伦贝谢的 ARC475 型、ARC675 型、ARC825 型和 ARC900 型随钻电磁波电阻率测井仪, 发射频率为 2 MHz 和 400 kHz, 5 种源距分别为 406.4, 558.8, 711.2, 863.6 和 1 016.0 mm, 有幅度比和相位差 2 种模式, 可提供 20 多条测井曲线。

随钻方位电磁波电阻率测井仪提高了方位探测能力, 探测距离可达 6~7 m。斯伦贝谢的 PeriScope 随钻方位电磁波电阻率测井仪能够提供 30 条不同探测深度的测井曲线, 实现 360° 二维成像及反演仪器到地层界面的距离和地层电阻率。斯伦贝谢的 GeoSphere 油藏随钻测绘技术提高了远探测能力, 能够揭示距离井眼 45.7 m 地层的层理与流体性质, 进行随钻油藏描述和地质导向。哈里伯顿的 EarthStar 油藏描述服务将边界远探测距离提高至 61 m。斯伦贝谢的 IriSphere 随钻前视技术首次将电磁技术用于监测钻头前方地层的特征, 可实时提供钻头前方 30 m 地层的电阻率^[15-16]。

1.2.3 随钻多功能测井技术

斯伦贝谢研发的多参数组合化测井技术能同时进行地层电阻率、中子孔隙度、地层密度、光电吸收截面指数 PEF、元素俘获截面 Σ 、伽马能谱及密度成像测量, 研发的 EcoScope 多功能随钻测井仪能提供电阻率、中子孔隙度、密度、超声井径、元素俘获截面 Σ 、伽马能谱等 20 条测井曲线, 同时提供电阻率成像和密度成像。该测井仪采用脉冲中子发生器 PNG 实现中子孔隙度测井、密度测井, 也可以用传统化学源 1.7 居里钷 137 伽马源进行密度测井; 而 NeoScope 随钻测井仪彻底放弃了化学源, 实现了近钻头、高脉冲中子产额高速传输、精确测量^[17-18]。

1.2.4 随钻地层测试技术

斯伦贝谢推出的 Stetho Scope 随钻地层测试系统采用探头式压力测量仪器, 随钻接单根时可安全有效地采集压力数据; 随后推出的 SpectraSphere 随钻地层流体成像测试仪, 可获取高质量的地层压力数据和典型流体的样本, 并能分析井下流体, 井下流体的分析水平达到了实验室级别。贝克休斯推出了新一代随钻流体分析服务系统 FASTrak Prism, 可以实时分析流体特征, 测量 pVT 参数。哈里伯顿推出的 InSite GeoTap IDS 实现了随钻地层流体取样, 并可实时传输储层特征参数, 但井下分析能力不足^[19]。

1.2.5 随钻多极子声波测井技术

斯伦贝谢相继推出单极子随钻声波测井仪 ISonic, 单极子、偶极子发射声源的随钻声波测井仪 SonicVision 和高、低频单极子及四极子发射声源的随钻声波测井仪 SonicScope, 可测量声波单极纵波数据和单极横波数据、交叉偶极挠曲波(斯通利波)和地层各向异性等声波属性, 同时能够实时传输单极子纵波、横波波速, 并在井下存储数据。最新推出的 TerraSphere 高分辨率成像测井仪采用随钻电磁与超声波双物理成像, 可在油基钻井液中提供高分辨率电阻率图像, 同时随钻提供高分辨率声波图像与井径数据。贝克休斯的 APX 随钻声波测井仪首次采用四极子波发射技术, 同时兼容单极子和偶极子信号的发射和接收。SoundTraK 随钻声波测井仪采用了独特的四极子声波激发模式, 可在极慢速地层中直接测量横波速度。哈里伯顿的补偿长源距随钻声波测井仪 CLSS、双阵列双模式随钻声波测井仪 BAT、四极子模式随钻声波测井仪 QBAT 和随钻交叉偶极声波成像测井仪 XBAT, 同样能在较差井眼环境下进行随钻声波测井^[20]。

1.2.6 三维随钻测绘技术

2022 年, 斯伦贝谢推出了 GeoSphere 360 三维油藏随钻测绘系统, 其集成了可实时传输至地面的新型井下测量工具、适用于复杂油气藏的新型反演算法、可随钻实时解释的计算模式, 可导出多个二维反演出的三维油藏图。目前, 该系统已在多种类型的地层环境中得到测试及应用。中东地区利用该系统对砂体进行实时三维测绘, 实现了井眼在最佳位置穿行; 北美地区使用该系统进行构造和地层表征, 优化了油田开发规划; 北海地区利用该系统集成了多尺度的测量数据, 降低了地质情况的不确定性, 提高了产能^[21]。

1.2.7 随钻地面流体测量技术

斯伦贝谢推出的 PureFlex 随钻地面流体测量系统是一种模块化井场气体分析仪, 可连续测量总烃、烷烃(C_1 至 C_5)和烯烃(乙烯和丙烯), 快速提供井场气体的烃类组分, 并可测量气体输出(振动筛)和气体输入(活性池), 根据烃类组分及其变化快速了解地层流体, 并最终消除极端 DBM(drill-bit-metamorphism, 钻头变质作用)情况下人工生成烷烃的影响。哈萨克斯坦某井应用了该系统, 发现常规气测与 PureFlex 气测结果存在明显差异, 且 DBM 校正前后数据对比表明, 当机械钻速逐渐降低时, 该系统识别并去除了 DBM 生成的烷烃, 提供了真实的气体组分和地层流体饱和度, 极大地提升了气测录井数据的质量^[22]。

1.3 旋转导向技术

1.3.1 斯伦贝谢

目前, 斯伦贝谢的 PowerDrive 旋转导向系统有推靠式(PowerDrive Orbit)、指向式(PowerDrive Xceed)和混合式(PowerDrive Archer)3 种。PowerDrive Orbit 系统耐温 $150\text{ }^\circ\text{C}$, 造斜率通常为 $(0^\circ\sim 3^\circ)/30\text{ m}$, 最大可达 $(4^\circ\sim 5^\circ)/30\text{ m}$, 可实时提供近钻头井斜角、方位角、近钻头伽马、方位伽马、近钻头伽马成像等参数; PowerDrive Xceed 系统耐温 $150\text{ }^\circ\text{C}$, 最大转速 350 r/min , 造斜率为 $(5^\circ\sim 8^\circ)/30\text{ m}$, 可以连接在 PowerPak 螺杆钻具下部, 与其组成动力旋转导向系统(Vortex Xceed); PowerDrive Archer 系统耐温 $150\text{ }^\circ\text{C}$, 造斜率可达 $(15^\circ\sim 17^\circ)/30\text{ m}$, 在保持全旋转的同时, 可通过改变排量和顶驱转速 2 种方式发送指令。斯伦贝谢最新研发 NeoSteer ABSS 推靠式钻头导向系统的最大造斜率为 $16^\circ/30\text{ m}$, 已在北美和阿根廷的非常规油藏中应用 250 次, 总进尺超过 792 480 m, 平均机械钻速 159.4 m/h ^[23-24]。

1.3.2 贝克休斯

贝克休斯的 AutoTrak 不旋转闭环钻井系统(RCLS)是一种静态推靠式旋转导向系统, 由地面与井下双向通讯系统、导向系统(AutoTrak 工具)和 LWD 组成。AutoTrak G3 旋转导向系统的理论造斜率为 $6.5^\circ/30\text{ m}$, 近钻头井斜零长 1.20 m , 伽马零长 5.54 m , 井斜与方位零长 8.54 m , 可以在旋转过程中实现导向, 并与地面实现双向通讯。AutoTrak X-treme 旋转导向系统的造斜率最高可达 $12^\circ/30\text{ m}$, 可与 LWD 相结合, 综合了高动力马达和高速旋转闭环系统, 并与导向装置实现双向通讯。AutoTrak eXpress 便携式旋转导向工具的理论造斜率为 $8^\circ/30\text{ m}$, 其近

钻头井斜零长为 1.20 m, 伽马零长为 9.60 m, 井斜与方位零长为 10.80 m。AutoTrack Curve 是专为陆地钻井设计的旋转导向系统, 其理论造斜率为 15°/30 m, 近钻头井斜零长为 2.00 m, 伽马零长为 3.74 m, 井斜与方位零长为 6.81 m^[23]。

1.3.3 哈里伯顿

哈里伯顿的旋转导向系统 Geo Pilo 是一种不旋转式导向工具, 主要靠不旋转外筒与旋转心轴之间的偏置机构产生导向作用, 设计造斜率为 15°/30 m, 最高转速 250 r/min, 最大工作压力 207 MPa, 最高工作温度 175 °C, 非工作状态下耐温 200 °C, 适用于大摩阻、大扭矩的大位移井和复杂程度较高的三维定向井/水平井^[24]。

1.3.4 威德福

威德福的旋转导向系统 Revolution 为指向式导向工具, 最大造斜率为 10°/30 m, 最高工作温度 165 °C, 最大工作压力 172 MPa, 适用于 $\phi(149.2\sim 444.5)$ mm 井眼。Magnus 推靠式旋转导向系统的造斜率可达 10°/30 m, 最高转速 300 r/min, 最高工作压力 207 MPa, 最高工作温度 150 °C, 最大垂向分辨能力 480 mm。Magnus 推靠式旋转导向系统采用模块化设计, 利用 3 个独立式推力块控制方位, 可获得近钻头 1.829 m 处的实时数据, 具有实时诊断、自动稳斜和双向通信等功能^[23]。

1.3.5 SABER 旋转导向系统

SABER 旋转导向系统是英国 Enteq Upstream (Enteq) 公司研发的新型机械式钻头导向工具, 需要与内有控制阀门的特殊钻头配合使用, 近钻头处设置电磁制动系统, 利用其控制钻头某一喷嘴喷出钻井液的流速产生切向力, 流量越大, 狗腿度越高, 实现了真正的钻头导向。该系统结构简单, 无传动轴, 不需要电池, 不需要使用传统旋导工具的肋板和活塞, 所有钻压都通过内部钻铤传递, 内部的电子器件和控制系统不受扭转振动的影响, 轴承是唯一的旋转部件, 从而降低了故障率。SABER 旋转导向系统使用寿命更长、可靠性更高、成本更低, 耐温可达 175 °C 以上。井下试验证明, SABER 旋转导向系统能够在各种井下条件下稳住工具面, 有望替代常规旋转导向系统。

2 需求分析及发展趋势

2.1 需求分析

随着油气勘探开发向深水、深层、非常规、致密

油气拓展, 油气资源品质劣质化和作业环境复杂化进一步加剧, 油气勘探开发面临着更深、更小、更薄、渗透率更低、更复杂的地质对象, 要提高老油田采收率、非常规油气单井产量、难动用储量有效动用率和作业效率, 降低油气开发成本, 均需要发展和应用随钻测控技术。

1) 复杂油气及老油田稳产增产需要随钻高精度成像测井技术。复杂油气藏及老油田是我国油气勘探开发的主阵地, 其资源量占探明储量的近 70%, 剩余可采储量及未动用储量占比达到 85% 以上, 产量占总产量的 90%, 大幅度提高剩余油气识别精度、油气井单井产量和油气采收率, 是实现复杂油气藏及老油田高效开发的主攻方向。为了更好地满足高效开发油气的需求, 优化井眼轨迹, 提高油气采收率和储层识别评价能力, 需要多维成像测井技术、井下原位地层分析技术、剩余油整体评价技术、高清成像测井技术、储层随钻远探测及前视电阻率成像系统、随钻模块地层测试器等油气藏高效识别与评价技术、提高难动用储量动用率的地质-工程一体化技术、自动化智能化工程技术等, 以实现地层、油藏、流体的在线分析和实时评价, 提高开发效率和油气井产量。

2) 非常规油气经济开发需要旋转导向技术。非常规油气资源储量大, 是未来油气的主要接替区。由于非常规油气丰度低、产能低、单井产量低, 一直面临着钻井周期长、成井成本居高不下的挑战, 要实现经济有效开发, 必须大幅度降低油气勘探开发成本。需要开发耐高温、高造斜、近钻头旋转导向系统, 满足深层页岩油气和常压页岩油气构建地质模型、甜点实时预测评价、一趟钻钻井提速、随钻测控等在内的大型井工厂高效钻完井技术, 降低成井与压裂改造作业成本。

3) 深层、超深层油气高效经济开发需要高温测量系统。深层、超深层油气是中国油气勘探开发的重要战略资源, 由于深层、超深层成岩环境复杂, 岩性差异大, 环境超高温高压, 岩石力学特性复杂, 对石油工程技术装备提出了更高的要求, 特别是顺北和顺南地区, 储层埋藏特深(7 500~8 800 m)、井底温度高(>180 °C、>90 MPa), 现有工具仪器的耐温性能不足, 损坏严重, 不能满足钻井、测试的要求^[25-30], 需要超深层油气成像和评价预测技术、抗 200 °C 高温 MWD 测量系统、高压气井水泥浆及井筒长期完整性控制技术、耐高温的压裂液和酸液及压裂技术、特深油气井智能优快钻井技术等, 提升

石油工程装备的耐温能力,提高作业效率和钻井速度,推动深层、超深层油气规模效益开发。

4) 自动化智能化钻完井技术发展需要高精度随钻测控技术。自动化智能化钻完井技术是未来钻完井技术的发展方向,是科学技术发展的标尺和技术竞争的制高点。随钻测控技术是实现自动化智能化钻完井的基础和重要保证。在大数据、云计算、物联网等信息技术快速发展的推动下,自动化智能化钻完井技术装备快速发展,地层精细描述、油藏精细评价、地层信息高速传输、井眼轨迹精准控制等均需要高精度的随钻测控技术。

2.2 发展趋势

1) 随钻测量技术。随着地质条件复杂程度的增加和欠平衡、随钻堵漏等钻井技术进步所造成井下测量条件的改变,需不断推出新的随钻测量技术和新的随钻测量仪器以应对极端环境对数据测量和传输的需求。测量智能化、实时化程度越高,对钻井过程和地层实时监控的作用越突出。随钻测量仪器从单一的几何定向功能向集成式平台扩展,可传输测量参数的种类不断丰富,并可以根据现场需要与电导率成像、近钻头伽马、地震等随钻测井仪器任意集成,为随钻测井和旋转导向仪器提供数据传输平台;随钻测量仪器的抗温、抗压能力进一步提升。实现 200 °C、206.9 MPa 超高温超高压环境下参数的实时测量,以应对深层、超深层和海洋油气资源勘探开发的需求;进一步提升大容量数据的传输速率,以满足需将大量井下实时测量参数传输至地面的需求,以及将地面指令快速准确地地下达至井下;利用传输信道实时切换、数据压缩等技术提升随钻传输效率,充分发挥各种传输方式的优势,降低使用成本。

2) 随钻测井技术。随钻测井技术是迈向自动化、智能化钻井的关键技术环节,将在保障井眼在储层最佳位置穿行,提高采收率、储层识别评价能力方面发挥重要作用。随钻测井技术将向随钻高精度成像发展,实现地层井筒高精度成像,快速评价井筒变化和地质特征,实时准确优化钻井参数;向随钻远探测、前探测发展,提高随钻声/电远探测能力,扩大随钻测井仪器的探测范围,提高储层的预判和分析能力;向组合化集成化发展,集成多个传感器(声、电、放射性等),实现随钻地层评价的准确性、实时性、安全性;研发随钻地层智能测试技术,将实验室搬入井下,智能分析地层及地层流体的物性。

3) 旋转导向技术。为了满足不同地质和钻井

工况需求,进一步提高作业效率,未来旋转导向技术有望在工具可靠性、智能化程度、自动化导向等方面取得更多进展。该技术将向高可靠性发展,以满足日益复杂的钻井环境需求;向耐高温高压发展,以满足高温高压地层对旋转导向技术的需求;向简单化、低成本发展,随着油气需求降低,油气田勘探开发降本的需求更强烈,在新理论、新技术和新工艺的推动下,旋转导向系统的结构日趋简单,研制成本和应用成本进一步降低;向自动化、智能化发展,为提高远程地质导向的控制精度和决策效率,在井下钻具上安装更多的传感器,以实现精确控制。

3 建议与启示

围绕油气勘探开发市场需求和技术发展方向,以保障油气勘探开发、提高储量动用率、提高单井产量、降低综合成本为目标,优化资源配置,强化基础理论研究,突出重大技术攻关,推进科研生产一体化发展,灵活运用合作与收并购,致力提升高端技术的研发能力,加速提升随钻测控技术水平,培育具有我国特色的随钻测控技术,推进中国随钻测控技术跨越式发展。

1) 强化重大技术攻关。高温高压随钻测量技术方面,优化完善 175 °C 高温 MWD、研制攻关 200 °C 高温 MWD、做好 230 °C 超高温 MWD 技术储备,并研制高速连续波脉冲传输仪器,实现随钻工具的标准挂接与集成,形成统一的研发平台和服务平台。高精度随钻测井技术方面,对于随钻成像探测技术,实现近钻头随钻伽马成像系统和随钻高分辨电阻率成像系统的工业化,完善随钻超声井壁成像系统;对于随钻远探测/前探测技术,实现随钻方位电磁波电阻率系统的工业化,研发随钻电磁波电阻率远探测技术,做好方位电阻率前探测技术储备;对于多维油藏评价随钻测井技术,研制随钻声波测井仪,做好随钻声波技术、随钻核磁共振技术和随钻地层测试技术储备,针对不同目标区块制定测试标准及作业规范;对于随钻智能解释与钻井风险评价技术,研究随钻智能地层评价与导向技术和随钻井下风险评价与监控技术。旋转导向技术装备方面,研制旋转导向技术标准化平台,实现实时智能决策,并攻关高造斜率旋转导向关键技术、低成本旋转导向技术和旋转导向增效技术。

2) 健全研发制造体系。明确技术发展方向和

目标, 谋划好技术发展策略。围绕勘探开发技术需求, 制定技术、产品研发计划和技术标准, 重点破解旋转导向、超高温 MWD 等“卡脖子”技术, 推进高速传输、远探测等短板技术; 做好知识产权布局, 强化国际专利申报。优化科技资源, 明确研发重点和分工; 发挥整体力量, 健全集中力量进行重大技术攻关的机制和体制, 开展旋转导向系统等重大技术攻关。建立完善随钻测控试验基地, 采用研究单位+生产企业+应用企业的模式, 完善测控装备仪器产品测试中心, 加快成果转化基地建设, 建立全尺寸实验中心, 建设模拟实钻区, 实现随钻测试技术的全过程检测与验证。建立随钻测控装备仪器制造中心, 引进一流的设备和人才团队, 建设一流的管理体制, 壮大发展高端仪器装备的加工、总装、调试与维保业务, 加快产业化进程。

3) 推进技术快速发展。加大技术交流合作, 构建创新联盟。深化与油田企业、高等院校和科研机构战略合作伙伴关系的建设; 吸纳国内外知名专家成立战略研究委员会, 确定技术创新方向; 充分利用国内外各类专家, 提升创新效率和水平。注重技术收并购, 发展壮大短板技术。借鉴国外油田技术服务公司的收购模式, 探索收购兼并策略, 按照“合作—参股—控股—兼并收购”循序渐进的收购方式, 迅速拥有特色技术、延长技术链、拓展业务范围, 扩大市场规模、提升市场竞争能力。加大投入力度, 持续提升创新能力。加大旋转导向、超高温 MWD、高精度成像测井、超前探测等高端技术装备研发的投入, 建立稳定的资金保证机制, 提高加工、测试、验证能力, 建立稳定的创新与服务队伍, 全面提升创新和市场竞争能力。引进高端人才, 聚集创新能量。充分利用特殊人才扶持政策及海外研发中心区位优势, 建议建立以市场价值为主导的人才薪酬机制, 全球招聘顶尖人才、领军人才, 引进海外高端研发人才, 建议搭建梯次合理的人才团队, 打造人才竞争高地。

4 结束语

随着油气勘探开发向“深地、深水、非常规、老油田、新能源”等复杂领域的推进, 油气藏埋藏更深(埋藏深度 10 000 m 以上)、井底温度更高(240 ℃ 以上)、地层和地层流体更加复杂, 要精准、实时、有效地识别评价油气藏、控制井眼轨迹, 提高油气勘探开发效率、储量动用率和单井产量, 降低综合

开发成本, 还需进一步提高和升级随钻测控技术装备的性能。按照“探索一批, 研发一批, 转化一批, 推广一批”的原则, 加大集智攻关力度, 强化基础理论研究, 突出重大技术研究, 灵活运用合作与收并购, 构建“产学研用”一体化研发体系, 着力破解核心技术装备与软件瓶颈, 加快推进随钻测控技术装备的高端化、产业化展, 为实现国内原油持续稳产 2.0×10^8 t 以上提供利器与保障。

参 考 文 献

References

- [1] 贾梦之, 耿艳峰, 闫宏亮, 等. 高速泥浆脉冲数据传输技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 160-170.
JIA Mengzhi, GENG Yanfeng, YAN Hongliang, et al. Review of high-speed mud pulse telemetry technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 160-170.
- [2] 陈兴祥, 刘虎, 冉富强. 电磁波随钻测量系统(EMWD)现状分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(19): 133-135.
CHEN Xingxiang, LIU Hu, RAN Fuqiang. Analysis of the current status of electromagnetic wave measurement while drilling (EMWD) systems[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017, 37(19): 133-135.
- [3] Schlumberger. xBolt G2 accelerated drilling service[EB/OL]. [2020-09-08]. <https://www.slb.com/drilling/surface-and-downhole-logging/measurements-while-drilling-services/xbolt-g2-accelerated-drilling-service>.
- [4] NOV. BlackStar EM MWD tool[EB/OL]. [2020-09-08]. <https://www.nov.com/products/blackstar-em-mwd-tool>.
- [5] NOV. BlackStar II MWD tools[EB/OL]. [2020-09-08]. <https://www.nov.com/products/blackstar-ii-mwd-tools>.
- [6] 许玛丽. 国内外随钻测量技术现状与展望[J]. 化工管理, 2019(17): 109-110.
XU Mali. Current status and prospects of measurement while drilling technology at home and abroad[J]. Chemical Enterprise Management, 2019(17): 109-110.
- [7] 胡永建, 黄衍福, 李显义. 磁耦合有缆钻杆关键技术与发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(1): 21-29.
HU Yongjian, HUANG Yanfu, LI Xianyi. Key technologies and development trend of magnetic-coupling wired drill pipe[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(1): 21-29.
- [8] Schlumberger. Orion II data compression platform[EB/OL]. [2020-09-08]. <https://www.slb.com/drilling/surface-and-downhole-logging/measurements-while-drilling-services/orion-data-compression-mwd>.
- [9] 王丽忱, 朱桂清, 甄鉴. 随钻测井数据传输技术新进展[J]. 石油科技论坛, 2014, 33(6): 42-45.
WANG Lichen, ZHU Guiqing, ZHEN Jian. New progress in LWD data transmission technology[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2014, 33(6): 42-45.
- [10] WHEELER A J, BILLINGS T, RENNIE A, et al. The introduction of an at-bit natural gamma ray imaging tool reduces risk associated with real-time geosteering decisions in coalbed methane horizontal

- wells[R]. SPWLA 2012-167, 2012.
- [11] ORTENZI L, DUBOURG I, VAN OS R, et al. New azimuthal resistivity and high-resolution imager facilitates formation evaluation and well placement of horizontal slim boreholes[J]. *Petrophysics*, 2012, 53(3): 197–207.
- [12] PITCHER J, SCHAFER D, BOTTERELL P. A new azimuthal gamma at bit imaging tool for geosteering thin reservoirs[R]. SPE 118328S, 2009.
- [13] PRAMMER M G, MORYS M, KNIZHNIK S, et al. Field testing of an advanced LWD imaging resistivity tool[R]. SPWLA-2007-AA, 2007.
- [14] RITTER R N, CHEMALI R, LOFTS J, et al. High resolution visualization of near wellbore geology using while-drilling electrical images[R]. SPWLA-2004-PP, 2004.
- [15] 刘乃震, 王忠, 刘策. 随钻电磁波传播方位电阻率仪地质导向关键技术 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58(5): 1767–1775.
LIU Naizhen, WANG Zhong, LIU Ce. Theories and key techniques of directional electromagnetic propagation resistivity tool for geosteering applications while drilling[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(5): 1767–1775.
- [16] 倪卫宁, 张晓彬, 万勇, 等. 随钻方位电磁波电阻率测井仪分段组合线圈系设计 [J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(2): 115–120.
NI Weining, ZHANG Xiaobin, WAN Yong, et al. The design of the coil system in LWD tools based on azimuthal electromagnetic-wave resistivity combined with sections[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(2): 115–120.
- [17] 侯亮, 杨虹, 刘知鑫. 2019 测井技术发展动向与展望 [J]. *世界石油工业*, 2019, 26(6): 58–63.
HOU Liang, YANG Hong, LIU Zhixin. Development and prospect of well logging technologies in 2019[J]. *World Petroleum Industry*, 2019, 26(6): 58–63.
- [18] 张桂清. 随钻测井发展历程及四大服务公司的随钻测井技术 [R]. 北京: 中国石油集团经济技术研究院, 2011.
ZHANG Guiqing. The development history of logging while drilling and the logging while drilling technology of the four major service companies[R]. Beijing: China Petroleum Corporation Economic and Technological Research Institute, 2011.
- [19] 刘建立, 陈会年, 高炳堂. 国外随钻地层压力测量系统及其應用 [J]. *石油钻采工艺*, 2010, 32(1): 94–98.
LIU Jianli, CHEN Huinian, GAO Bingtang. Foreign measurement system for formation pressure while drilling and its application[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2010, 32(1): 94–98.
- [20] 卫建清, 何晓, 陈浩, 等. 随钻四极源声波测井多模式采集测量 TTI 地层各向异性的研究 [J]. *地球物理学报*, 2018, 61(2): 792–802.
WEI Jianqing, HE Xiao, CHEN Hao, et al. Inversion of anisotropy in a TTI stratum using quadrupole acoustic LWD and multimode acquisition[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(2): 792–802.
- [21] Schlumberger. GeoSphere 360 3D reservoir mapping-while-drilling service[EB/OL]. [2023-10-25]. <https://www.slb.com/-/media/files/drilling/product-sheet/geosphere-360-tt-ps.ashx>.
- [22] Schlumberger. PureFlex surface fluids logging while-drilling service[EB/OL]. [2023-10-25]. <https://www.slb.com/-/media/files/drilling/product-sheet/pureflex-ps.ashx>.
- [23] 冯定, 王鹏, 张红, 等. 旋转导向工具研究现状及发展趋势 [J]. *石油机械*, 2021, 49(7): 8–15.
FENG Ding, WANG Peng, ZHANG Hong, et al. Research status and development trend of rotary steerable system Tool[J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(7): 8–15.
- [24] MATHEUS J, IGNOVA M, HORNBLOWER P. A hybrid approach to closed-loop directional drilling control using rotary steerable systems[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, 45(8): 84–89.
- [25] 宣扬, 刘珂, 郭科佑, 等. 顺北超深水平井环保耐温低摩擦阻钻井液技术 [J]. *特种油气藏*, 2020, 27(3): 166–168.
XUAN Yang, LIU Ke, GUO Keyou, et al. Environmental anti-temperature low friction drilling fluid technology of ultra-deep horizontal well in Shunbei Oil & Gas Field[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(3): 163–168.
- [26] 陈宗琦, 刘景涛, 陈修平. 顺北油气田古生界钻井提速技术现状与发展建议 [J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(2): 1–6.
CHEN Zongqi, LIU Jingtiao, CHEN Xiuping. Up-to-date ROP improvement technologies for drilling in the Paleozoic of Shunbei Oil & Gas Field and suggestions for further improvements[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(2): 1–6.
- [27] 赵海洋, 范胜, 连世鑫, 等. 顺北油气田用抗高温弱凝胶防气侵钻井液体系 [J]. *钻井液与完井液*, 2023, 40(3): 332–339.
ZHAO Haiyang, FAN Sheng, LIAN Shixin, et al. Study on high temperature resistant weak gel anti gas invasion drilling fluid system in Shunbei Oil & Gas Field[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2023, 40(3): 332–339.
- [28] 白彬珍, 曾义金, 葛洪魁. 顺北 56X 特深水平井钻井关键技术 [J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(6): 49–55.
BAI Binzhen, ZENG Yijin, GE Hongkui. Key technologies for the drilling of ultra-deep horizontal Well Shunbei 56X[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(6): 49–55.
- [29] 刘湘华, 杜欢, 刘彪, 等. 顺北 IV 号条带超深高温定向井钻井关键技术 [J]. *石油钻采工艺*, 2022, 44(6): 665–670.
LIU Xianghua, DU Huan, LIU Biao, et al. Key technology of directional drilling in the ultra-deep high-temperature IV belt, the Shunbei Oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(6): 665–670.
- [30] 刘湘华, 刘彪, 杜欢, 等. 顺北油气田断裂带超深水平井优快钻井技术 [J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(4): 11–17.
LIU Xianghua, LIU Biao, DU Huan, et al. Optimal and fast drilling technologies for ultra-deep horizontal wells in the fault zones of the Shunbei Oil & Gas Field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(4): 11–17.

[编辑 刘文臣]