

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.2024105

引用格式: 秦永和. 滑动导向与旋转导向钻井技术进展及发展对策 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(6): 1-9.

QIN Yonghe. Progress and development strategies of sliding and rotary steerable drilling technologies [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(6): 1-9.

滑动导向与旋转导向钻井技术进展及发展对策

秦永和

(中国石油天然气集团有限公司, 北京 100010)

摘 要: 旋转导向钻井技术是实现油气钻井向数字化、智能化方向发展的核心技术, 已经在国外定向井/水平井钻井中得到广泛应用, 其核心装备旋转导向钻井系统也已成为油气钻井工程领域最重要的前沿装备之一。在介绍滑动导向钻井与旋转导向钻井技术原理和特点的基础上, 分析了国内外旋转导向钻井技术的主要进展, 提出了我国旋转导向钻井技术发展方向和发展路径。分析认为, 随着油气勘探开发向更深层、更复杂的环境迈进, 滑动导向钻井技术的提升空间有限, 旋转导向钻井技术的应用将更加普遍; 国内旋转导向系统与国外相比差距很大, 需要加强旋转导向钻井井下闭环控制、随钻测量数据传输等基础研究, 强化旋转导向系统偏置方式、测量控制方式、井下动力源驱动方式技术攻关, 构建完善井下智能控制闭环、地下地面双向通信、井场总部远程监控“三环”高速畅联、相辅相成的软件系统, 加快推进旋转导向钻井技术迭代升级和推广应用, 实现我国定向井/水平井钻井方式从滑动导向为主向旋转导向为主转变, 从而助力我国深层、深海和非常规油气勘探开发实现跨越式发展。

关键词: 导向钻井; 滑动导向; 旋转导向; 技术进展; 发展建议

中图分类号: TE927; TE242

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)06-0001-09

Progress and Development Strategies of Sliding and Rotary Steerable Drilling Technologies

QIN Yonghe

(China National Petroleum Corporation, Beijing, 100010, China)

Abstract: The rotary steerable drilling technology is the core technology to realize the development of oil and gas drilling towards digitalization and intelligence. It has been widely used in foreign directional well/horizontal well drilling, and its core equipment, rotary steerable drilling system, has become one of the most important cutting-edge equipment in the field of oil and gas drilling engineering. The principles and characteristics of sliding and rotary steerable drilling technologies were introduced, and the progress of rotary steerable drilling technology in China and abroad was analyzed. The development direction and implementation path of rotary steerable drilling technology in China were pointed out. It is suggested that with the development of oil and gas exploration and development towards deeper and more complex environments, the space for potential exploration and improvement of sliding steerable drilling technology is limited, and the application of rotary steerable drilling. Will be more widespread. There is a big gap between Chinese rotary steerable drilling systems and foreign ones. Therefore, it is necessary to strengthen basic research on downhole closed-loop control and measurement data transmission while drilling of rotary steerable drilling and optimize the bias method, measurement control method, and downhole power source-driven method of rotary steering system. Moreover, it is important to build and improve the software system involving intelligent downhole closed-loop control, underground and ground two-way communication, and remote monitoring of the well site headquarters, which are interconnected and complementary, accelerate the iterative upgrading and widespread

收稿日期: 2024-07-24。

作者简介: 秦永和 (1963—), 男, 河北滦州人, 1985 年毕业于华东石油学院钻井工程专业, 2006 年获中国石油大学 (北京) 油气井工程专业博士学位, 正高级工程师, 享受国务院政府津贴, 现任中国石油集团公司科协副主席、中国石油大学 (北京) 智能钻井技术与装备研究中心主任, 主要从事钻井完井技术研究及管理工作。系本刊编委会副主任。E-mail: qinyonghe1963@sina.com。

基金项目: 中国石油集团战略研究与咨询项目“工程技术与装备迭代升级发展研究” (编号: 2023DQ0715) 资助。

application of rotary steerable drilling technology, and achieve the transformation of China's directional well/horizontal well drilling method from sliding steerable drilling technology to rotary steerable drilling technology, so as to help China achieve leapfrog development in deep, deep-sea, and unconventional oil and gas exploration and development.

Key words: steerable drilling; sliding steering; rotary steering; technical progress; development suggestion

目前,滑动导向钻井和旋转导向钻井是定向井/水平井常用的2种钻井技术。滑动导向钻井技术在导向钻进时,由于钻柱不旋转,沿着井壁向下滑动,会出现摩阻高、扭矩大、钻速慢、井下复杂多等突出问题^[1-4],虽然采取了一系列技术措施,也取得了较好的效果,但由于滑动导向钻井技术在原理上存在缺陷,这些问题并没有得到根本解决。旋转导向钻井技术可以在钻井过程中实现钻柱旋转,与滑动导向钻井技术相比,摩阻和扭矩显著降低,能够实现井眼轨迹精确导向和控制,具有更高的钻井效率和更好的井身质量^[5-8]。目前,旋转导向系统已成为油气井工程领域最重要的前沿装备之一,也是油气钻井向数字化、智能化方向发展的核心技术和关键装备。近10年来,全球旋转导向钻井的业务量和收益已经超过了常规定向钻井^[9]。尽管如此,由于我国旋转导向系统的研发起步较晚,缺少性价比高的旋转导向系统,在定向井/水平井钻井中仍广泛应用滑动导向钻井技术,旋转导向钻井技术应用相对较少。例如,美国95%以上的页岩油气井采用了旋转导向钻井技术,而我国仅有20%的页岩油气井采用了旋转导向钻井技术,差距十分明显,这也在较大程度上影响了我国页岩油气勘探开发的效率和效益。为了加快我国导向钻井方式从滑动导向向旋转导向转变,提高定向井/水平井钻井效率和质量,在简要介绍滑动导向与旋转导向钻井技术原理、主要特点的基础上,总结了主要技术进展和存在的问题,明晰了我国导向钻井技术的发展基础和主要差距,提出了发展方向和实现路径,以期推动我国旋转导向钻井技术快速高质量发展,进而助力我国深层、深海和非常规油气勘探开发实现跨越式发展。

1 滑动导向钻井技术特点与进展

1.1 滑动导向钻井技术原理

滑动导向钻具组合一般为钻杆+钻铤+MWD/LWD+弯螺杆钻具+钻头,能够完成定向井/水平井的定向造斜、井眼轨迹调整和复合钻进等施工^[1-4]。定向造斜是指利用滑动导向钻具组合完成造斜段施工;井眼轨迹调整是指在井斜角或方位角不能满足

井眼轨道设计或地质要求时,固定钻具工具面角后进行的滑动导向钻井作业;复合钻进是指弯螺杆钻具与转盘或顶驱联合转动,完成稳斜段钻进作业。井眼轨迹调整和复合钻进可以交替进行,一般以复合钻进井段的长短来体现滑动导向钻井技术水平的高低。需要特别指出的是,在采用滑动导向钻具定向或调整井眼轨迹时,必须首先找准和固定工具面,并锁定上部钻具,使其不能转动,弯螺杆钻具带动钻头旋转,靠上部钻具沿井壁向下滑动施加钻压,钻头才能沿设计方向钻进。

1.2 滑动导向钻井技术主要进展

针对滑动导向钻井存在的突出问题,近年来在装备配套、井眼轨道和钻具组合优化设计、水力振荡器和顶驱扭摆系统等减摩降扭工具研制、钻井液体系优选和性能优化、钻井参数优化等方面加强了研究与应用,提高了滑动导向钻井效率和效果,也形成了一套行之有效的滑动导向钻井技术体系。

1)强化装备配套。配备70DB以上钻机、90 kN·m以上带扭摆功能的顶驱,满足拉力高、扭矩大和扭摆需要;配备F-2200HL及以上钻井泵、52 MPa双立管,满足大排量、高泵压、长时间循环的需要;配备负压振动筛(筛布200目以上)、中高速离心机,满足在高黏度钻井液条件下清除有害固相的需要;配备 $\phi 139.7$ mm或 $\phi 127.0$ mm大水眼、高钢级、加厚钻杆,满足高抗拉抗扭和增钩载降压耗的需要。

2)优化井眼轨道设计。应用恒曲率法和变曲率法,以摩阻扭矩最小为原则来设计大位移井、长水平段水平井井眼轨道。一般采用低造斜率($3^\circ/30$ m)的“增—稳”井眼轨道,并尽量缩短井斜角 $40^\circ\sim 60^\circ$ 井段的长度,以减缓或防止形成岩屑床。

3)优化钻具组合设计。钻具外径越大,与井壁的接触面积越大;钻具的刚性越高,钻进时的摩阻越大,从而影响滑动钻进效率。因此,为使钻头获得较大钻压和扭矩,在设计钻具组合时,尽量减少钻铤数量,并采用欠尺寸稳定器。例如, $\phi 311.1$ mm井眼滑动导向钻具组合优化为: $\phi 311.1$ mm PDC钻头+ $\phi 244.5$ mm弯螺杆钻具(1.25°)+ $\phi 300.0$ mm稳定器+ $\phi 203.2$ mm无磁钻铤1根+ $\phi 203.2$ mm MWD+ $\phi 203.2$ mm无磁钻铤1根+ $\phi 127.0$ mm加重钻杆。

4) 研发应用水力振荡器等减摩降阻工具。按照设计安放位置和数量, 将减摩降阻工具安装在钻柱上, 与钻柱一起转动, 可以达到降低扭矩传递损失率、钻杆与套管间摩阻的目的。水力振荡器可以产生轴向振动, 带动附近钻具振动, 降低钻具与井壁之间的摩阻, 缓解定向钻进托压问题。振荡螺杆

钻具是在常规螺杆钻具的基础上, 增加了脉冲振荡机构, 实现了螺杆内部水击振动, 产生径向摆动, 既具备常规螺杆钻具的功能, 又能缓解近钻头托压现象, 其基本结构如图 1 所示。例如, 宁 209H35-5 井应用了振荡螺杆, 仅用时 8 d 就顺利完成长度 1 540 m 的三开井段, 创造了当时“三开一趟钻”的纪录。

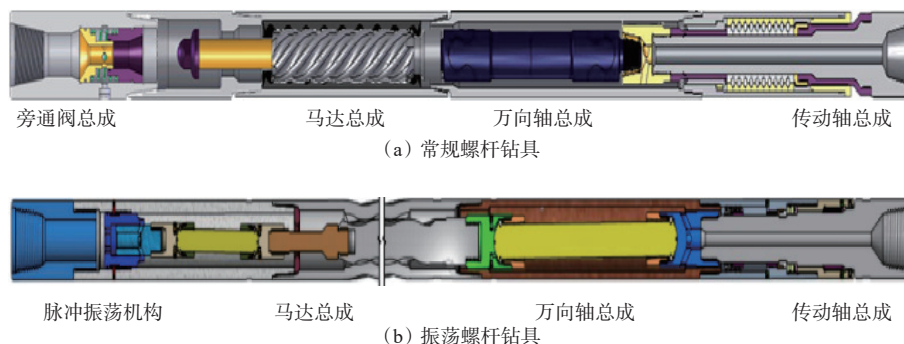


图 1 常规螺杆钻具和振荡螺杆钻具的基本结构

Fig.1 Basic structure of oscillating positive displacement motor

5) 研发应用顶驱扭摆系统。该系统可以控制顶驱在保证工具面稳定的前提下, 使上部钻具在定向或扭方位时处于左右扭摆的微复合钻进状态, 从而降低上部钻具的静摩阻, 改善钻压传递, 提高机械钻速。2021 年以来, 顶驱扭摆系统在大港、华北、冀东、长庆、四川等油气田广泛应用, 平均提速 62.1%, 且有效缓解了托压、钻具自锁、螺杆钻具制动等问题, 延长了螺杆钻具的使用寿命。

6) 应用岩屑床破坏接头。其基本原理是环空钻井液流经带螺旋槽的岩屑床破坏接头后, 产生具有一定能量的漩涡, 促使井下环空低速区的岩屑颗粒进入上环空高速区; 同时随钻柱旋转对已经形成的岩屑床进行机械扰动, 脱落的岩屑在漩涡作用下被携带走, 从而显著提高随钻清除岩屑床的效果。例如, NP13-1706 井井斜角为 $58^{\circ} \sim 82^{\circ}$ 井段, 从钻头以上 200 m 开始, 每 4 柱钻具安装 1 个岩屑床破坏接头, 共使用 4 个。实钻结果显示, 应用岩屑床破坏接头后, 转速从 $60 \sim 80$ r/min 增至 $90 \sim 100$ r/min, 钻柱扭矩从 $37 \sim 44$ kN·m 降至 $29 \sim 35$ kN·m, 岩屑返出量增加, 监测当量循环密度正常, 起下钻通畅。

7) 应用优质钻井液体系。为缓解滑动导向钻井过程中的高摩阻和托压难题, 研究应用了具有优质防塌、润滑和携砂性能的有机盐钻井液、复合有机盐钻井液和油基钻井液, 并不断优化钻井液性能参数: 滤失量小于 4 mL, 高温高压滤失量小于 12 mL, 固相含量小于 13%, 含砂量小于 0.3%, 滤饼厚度小

于 0.3 mm, 摩擦系数小于 0.04, 动塑比大于 0.5。另外, 配合起下钻或下套管通井到底循环除砂, 专门配置泵入携砂液(稀塞+稠塞), 也起到了良好的效果。

8) 优化钻进参数。精确计算钻柱正弦屈曲和螺旋屈曲的临界钻压, 优选钻压, 防止滑动导向钻进时, 因钻具过载而发生钻具屈曲甚至自锁; 增大排量, 保持环空紊流, 提高环空返速, 改善井眼清洁效果; 在转速 $60 \sim 120$ r/min 范围内尽量提高转速, 以增强钻井液携岩效果, 预防和破坏岩屑床。

9) 采用预防和清除岩屑床的系列技术措施。a) 及时划眼。在井斜角 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 造斜井段, 每钻进 1 根立柱进行正、倒划眼各 1 次; 井斜角超过 30° 后, 每钻进 1 根立柱进行正、倒划眼各 2 次。b) 强化短起下钻。当井斜角超过 30° 后, 每钻进 200~300 m 短起下钻一次, 随着井深、井斜角和水平位移的增加, 每钻进 100~200 m 或不超过 24 h 短起下钻 1 次。c) 强化钻井液循环。每次下钻或短起下钻到底后, 要及时循环钻井液, 以清除井内岩屑。同时, 根据岩屑上返情况和井眼实际情况, 适当提高钻井液循环排量和延长循环时间。

10) 加强井下状况的监测。a) 当摩阻扭矩增大或井底循环当量密度增加 $0.01 \sim 0.02$ kg/L 时, 及时采取扭摆、停钻、提高钻井液黏度和排量、划眼、短起钻、注入稀稠携砂塞等技术措施, 以强化井眼清洁效果。b) 低速起钻, 遇拉力增大时采取大排量倒划眼措施, 及时清除岩屑床或键槽等, 防止卡钻。

c)下钻时,如果根据钻进情况预测下井壁已经形成岩屑床,则在钻具上提前加装水力振荡器和岩屑床破坏接头等工具。下钻遇阻时,采取正划眼、大排量循环、短起下钻等措施。

1.3 滑动导向钻井技术存在的问题

滑动导向钻井时,尽管采取了许多技术措施,但由于井下钻具组合中只有钻头和钻头上方的配合接头(二者长度小于1 m)随螺杆钻具转子转动,而其他绝大部分钻柱不转动,所以仍然存在一些突出问题。

1)钻进时钻柱不旋转,会导致井眼循环携岩困难,井眼底边岩屑床厚度增加,再加上绝大部分钻柱躺在下井壁上,钻进时的摩阻扭矩会很大,而且弯螺杆钻具的弯角越大,摩阻越大^[1]。当水平位移超过临界水平位移(4 000 m)时,很难均匀连续滑动钻进,甚至无法滑动钻进^[1]。这也是滑动导向钻井技术难以在大位移井广泛应用的主要原因。

2)由于摩阻大,存在不同程度的托压现象,不仅影响了钻压和扭矩的传递,也降低了螺杆钻具旋转钻头的有效功率,从而会导致钻头上实际钻进参数减小,钻速大幅降低。

3)在滑动钻进过程中,经常会出现井眼清洁困难、钻具粘滑涡动、阻卡严重、钻速过低、井眼轨迹控制困难等现象,容易导致发生井下故障、井眼不光滑和储层钻遇率低等问题,有时也会影响到后续固井质量和压裂效果,进而影响到油气井产量。为了预防或处理井下故障,不得不采用弯螺杆钻具和转盘(或顶驱)交替钻进、频繁短起下钻和起下钻等措施,从而大大降低了钻井效率,增加了钻井成本。

2 旋转导向钻井技术特点与进展

迄今为止,导向钻井钻具组合已经发展到第三代^[10-12]。第一代是弯接头钻具组合:单点测量仪+弯接头+直螺杆钻具+钻头;第二代是弯外壳钻具组合:MWD/LWD+弯螺杆钻具+钻头;第三代是偏心垫块(偏心环)钻具组合:MWD/LWD+直螺杆钻具+旋转导向头+钻头。前两代钻具组合属于滑动导向钻井,第三代钻具组合则属于旋转导向钻井,如图2所示。三代钻具组合带来的变化是:造斜支点逐次下移,钻头侧推力逐次增大,造斜率逐次增加,反扭力逐次减小,井眼轨迹控制难度逐次降低,井身质量逐次变好;同时,井下测量方式由单点测量到多点测量、MWD、LWD和近钻头测量的转

变。导向钻具组合加上井下测量方式的变化,加快了旋转导向钻井技术的诞生及发展,也很好解决了滑动导向钻井存在的诸多问题。

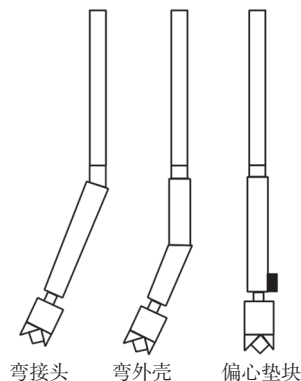


图2 3种导向钻井钻具组合造斜方式示意

Fig.2 Three deflection methods of steerable drilling tool assembly

2.1 旋转导向钻井技术的基本原理

旋转导向系统是一种钻柱可以连续旋转的定向钻井装置,主要由地面监控子系统、双向通信子系统、井下测量子系统、短程通信子系统和井下工具子系统组成^[5-8],如图3所示。

旋转导向系统的核心工具是导向头,其导向原理一般分为推靠式和指向式(如图4所示)。推靠式旋转导向系统是在钻头附近直接给钻头提供侧向力,以贝克休斯 Auto Track 旋转导向系统为代表;指向式旋转导向系统是通过近钻头处钻柱的弯曲使钻头指向井眼轨迹控制方向,以哈里伯顿 Geo-Pilot 旋转导向系统和斯伦贝谢 Power Drive Xceed 旋转导向系统为代表^[5-6]。

2.2 旋转导向钻井技术的主要优势

旋转导向钻井技术在美国油气开发中得到广泛应用,特别是在页岩油气开发中应用比例达到95%以上,而且效果显著。例如:高造斜率,缩短了靶前距,提高了造斜段钻进效率;形成了薄储层长水平段钻井关键技术,页岩油气水平井水平段长度突破8 000 m,有力支撑美国实现了非常规油气革命。旋转导向钻井技术在我国也进行了大量应用并取得较好效果。例如:长宁-威远国家级页岩气开发示范区页岩气水平井造斜段应用旋转导向钻井技术,与常规钻井技术相比,钻进效率提高了3~5倍;新疆玛湖油田油井造斜段应用旋转导向钻井技术钻进,平均段长596 m,平均施工周期7 d,与滑动导向钻井相比,钻进效率提高了3.53倍。

实践证明,与滑动导向钻井技术相比,旋转导



图 3 旋转导向系统的组成

Fig.3 Composition of rotary steering system

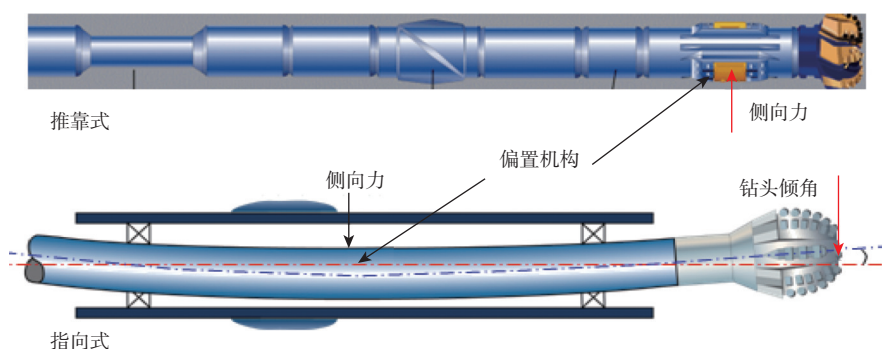


图 4 推靠式和指向式旋转导向系统

Fig.4 Push-the-bit and point-the-bit rotary steering systems

向钻井技术具有无可比拟的优势：

- 1) 不存在钻压施加困难的问题，允许大钻压、高转速钻进，钻速高，钻井周期短，综合效益好；
- 2) 井眼轨迹控制精确，井眼光滑，三维绕障能力强，适合“井工厂”钻井，有利于安全高效钻进；
- 3) 井眼净化效果好，摩阻扭矩小，井下故障少，能有效延长水平段长度；
- 4) 配套工程地质多参数随钻测量仪器，能有效提高储层钻遇率和油气井产量。

2.3 旋转导向系统的主要进展

2.3.1 国外旋转导向系统的进展

目前，国外旋转导向系统已发展到以“高温、高造斜率、多参数、智能化”为特点的第三代产品。其中，斯伦贝谢的产品以 Neosteer Clx 为代表，哈里伯顿的产品以 iCruise[®] 为代表，贝克休斯的产品以 Lucida 为代表，其关键参数见表 1^[13-15]。

哈里伯顿 iCruise[®] 旋转导向系统最大造斜率

18°/30m，可实现大钻压、高转速、高扭矩快速钻进；具有井下闭环导向控制功能，适用于垂直钻井、水平井钻井；配套 EarthStar[®] X 近钻头超深探测电阻率和前探测电阻率技术，可实现近钻头 60 m（行业最深）半径储层描绘和 30 m 前探。

斯伦贝谢 NeoSteer Clx 旋转导向系统的创新性最强，钻头与导向执行机构采用一体化设计，靠水力驱动，实现了钻头推靠；可以实现智能闭环，技术已经成熟并应用于页岩油气长水平段水平井钻井，可实现更高造斜率、更快速度、更好井眼和更长水平位移的效果。

2.3.2 国内旋转导向系统主要进展

国内旋转导向系统研发较晚，主要以推靠式为主^[16-17]，目前基本处于第一代产品水平（见表 2）。其中，中国石油成功研制了 CNPC-IDS 和 CG-STEER 两种旋转导向系统，并建立了维保、测试等标准体系；中国石化研制出 SINOMACS ATS 旋转导向系

表 1 国外旋转导向系统类型及关键参数

Table 1 Types and key parameters of foreign rotary steering systems

型号	贝克休斯Auto Trak			斯伦贝谢PowerDrive			哈里伯顿Geo-Pilot		
	G3	Cruve	Lucida	Xceed	Archer	NeoSteer CLx	Hybrid	Dirigo	iCruise
技术特点	推靠式	推靠式	小尺寸、静态推靠、 高温、高造斜	指向式	混合式	全旋转、钻头推靠、 高集成、智能化	指向式	指向式	全旋转、动态推靠、智能化
最大造斜率/ ($^{\circ}$) $\cdot$ (30m) $^{-1}$	6.5	15.0	15.0	8.0	15.0	15.0	15.0	10.0	18.0
最大钻压/kN	255	250		245	245		245	245	289
最大转速/ (rmin $^{-1}$)	400	250	400	350	350	350	250	245	400
最高工作温度/ $^{\circ}$ C	150	150	175	150	150	150	150	150	150
最大静压/MPa	140	140		140	140		175	175	140
近钻头井斜 $^{\textcircled{1}}$ /m	1.0	1.8	有	4.4	2.0	有	1.0	1.0	有
近钻头伽马 $^{\textcircled{1}}$ /m	5.4	3.5	有		2.7	有	1.0	1.0	有

注: $^{\textcircled{1}}$ 表示仪器测量点离钻头的距离。

表 2 国内旋转导向系统类型及主要参数

Table 2 Types and main parameters of domestic rotary steering systems

序号	研发企业	产品名称	系统类型	系统规格	适用温度/ $^{\circ}$ C	系统现状
1	中国海油	Welleader $^{\textcircled{R}}$	静态推靠式	475, 675和950	≤ 150	675已产业化, 475和950处于试验阶段
2	中国石化	SINOMACS ATS	静态推靠式	675	≤ 165	投入应用
3	川庆钻探	CG-STEER	静态推靠式	675	≤ 150	投入应用
4	航天一院	AutoServo	静态推靠式	475, 675和950	≤ 150	投入应用
5	中油测井	CNPC-IDS	静态推靠式	475和675	≤ 175	投入应用
6	天意石油	D-Guider RSS	静态推靠式	675	≤ 150	投入应用
7	中国科学院		静态推靠式	475和675	≤ 150	研发阶段
8	宏华石油		静态推靠式	675	≤ 150	研发阶段
9	西安石油大学		静态推靠式	675	≤ 150	样机试验

统,中国海油研制出 Welleader $^{\textcircled{R}}$ 旋转导向系统,航天一院研制出 AutoServo 旋转导向系统。目前,我国旋转导向系统在定向井/水平井钻井中应用比例约为 20%,而且旋转导向系统的水平较低,随钻 MWD/LWD 测量参数少,今后发展潜力巨大。

2.4 国内旋转导向钻井技术存在的主要问题

国内旋转导向钻井技术经过 10 多年的快速发展,在地面控制、信号传输、信号测量、井下控制和旋转导向工具等方面取得了显著进步,但与国外相比,仍然存在较大的差距。

1)国外在井下闭环控制、地面系统噪音处理、随钻测量数据处理等方面研究更深入、更全面,国

内导向钻井基础理论研究相对薄弱。

2)国外旋转导向系统有多种类型,工具尺寸呈系列化,适用温度较高,可以满足 $\phi 152.4\sim\phi 444.5$ mm 井眼和抗高温钻井需要,国内仅研制出推靠式旋转导向系统,工具尺寸单一,抗高温能力较差。

3)国外旋转导向系统的可靠性、稳定性明显优于国内旋转导向系统。

4)国外旋转导向系统的随钻测量参数多,传输速率可达 30 bit/s 以上,前探和探边距离可达 30~60 m,正在向随钻测量和随钻地层评价方向发展。国内旋转导向系统的随钻测量参数较少,传输速率仅有 3 bit/s 左右,且不具备前探和远探功能。

5) 国外旋转导向系统智能化程度高, 已经实现了自主巡航导向钻井^[18-22], 国内旋转导向系统智能化研究还处于起步阶段。

3 国内旋转导向技术发展方向与路径

随着我国深井超深井、大位移井和特殊工艺井不断增多, 对旋转导向钻井技术的需求会不断增加, 对其性能要求也越来越高, 需要不断加强旋转导向钻井关键技术和核心工具的攻关研发, 尽快提高我国旋转导向钻井技术水平, 以满足安全高效钻井的需求。

3.1 国内旋转导向钻井技术的发展方向

针对国内旋转导向钻井技术存在的问题, 应大力推进国产旋转导向系统向多参数、高性能、多功能、易操作、集成化、数字化、可视化、智能化和井下智能闭环方向发展。

近期发展方向和目标: 1) 实现旋转导向系统的规格化、系列化, 满足 $\phi 101.6 \sim \phi 444.5$ mm 井眼钻井需求; 2) 提升旋转导向系统的稳定性、抗温性和可靠性, 增加其行程钻速和进尺; 3) 扩大旋转导向钻井技术的应用范围, 并强化人员培训, 尽快把旋转导向钻井技术变成一项常规钻井技术。

远期发展方向和目标: 1) 实现井下智能闭环钻井, 即形成井下智能控制(实现按照设计的井眼轨道或地质要求的井眼轨道自主导向钻进)以及井下与地面双向高速传输(实现地面指令能及时改变井下钻进模式)两个闭环; 2) 实现地面远程智能决策与控制, 即专家利用大数据分析、人工智能等技术对多口井钻井过程进行仿真模拟、参数优化、井身结构设计、故障智能诊断、风险识别与预测、实时分析决策与控制; 3) 实现“航地”——“井下自动驾驶”, 形成集精准制导、深远探测、闭环调控、智能决策于一体的智能旋转地质导向钻井技术, 大幅提高储层发现率和钻遇率; 4) 实现“超级一趟钻”质的飞跃, 即综合应用智能旋转地质导向+井筒压力自适应+钻头钻进自适应等先进技术, 大幅增加单只钻头进尺和钻井速度, 大幅降低工程风险和成本, 大幅提高低品位油气资源的开发效益。

3.2 国内旋转导向钻井关键技术攻关方向

旋转导向钻井技术涉及机械、电子、液压、测量、控制、材料等多学科知识, 以及钻井、测井、录井、地质等多专业技术, 需要围绕其近期及远期发展目标, 组建强有力的跨领域、跨专业、跨单位研发

团队, 采取战略性举措, 持续开展关键技术攻关, 不断迭代升级技术与装备。

1) 攻关优选偏置方式。推靠式旋转导向系统在实际应用中存在一些问题: 井眼轨迹不够平滑, 影响井身质量和固井质量; 钻头和钻头轴承磨损较快, 影响行程钻速和进尺。指向式旋转导向系统属于钻头倾角导向, 造斜率受地层因素影响小, 钻出的井眼较平滑, 钻柱的摩阻和扭矩较小, 可以使用较大的钻压钻进, 机械钻速较高, 而且钻头和钻头轴承承受的侧向载荷小, 有助于发挥钻头性能, 井眼延伸能力强, 适应中软地层。因此, 国内应该开展指向式旋转导向系统关键技术与工具的攻关研究, 尽快实现指向式旋转导向系统的突破。另外, 一种基于伯努利方程原理、利用液力作用使钻头产生侧向力的导向钻井技术, 简化了导向执行机构的内部结构, 也应加快研究。

2) 攻关优选测控控制方式。目前, 国内旋转导向系统都采用静态测控平台, 而国外旋转导向系统则大多采用动态测控平台。动态测控的原理是测控机构与钻柱保持同速率反方向转动, 使测控机构与大地保持相对静止, 从而实现导向工具姿态的准确测量和偏置力方向的有效控制, 其研发难度就在于保证测控机构的反转速度与钻柱的正转速度绝对一致。国内应开展动态测控平台姿态测量、导向控制方法的研究, 以实现动态推靠式旋转导向系统的研制和应用, 填补国内在该方向上的空白。

3) 攻关研究全姿态稳定控制平台。全姿态稳定控制平台实现了旋转状态下的姿态测量, 相对于动态测控平台, 姿态测量部分可以随着钻柱同步旋转, 优化了同速率反方向转动机构, 减少了动力消耗。需要开展捷联式测量平台多源动态姿态测量方法和全姿态稳定控制平台导向控制方法的研究, 实现基于全姿态稳定控制平台的新型旋转导向系统的研制。

4) 攻关随钻测量和测井技术体系。目前, 国外随钻测井技术已用于地质导向钻井和随钻地层评价(尤其是大斜度井), 这有利于实现卡层中靶, 提高储层钻遇率, 及时识别钻井风险, 缩短钻完井周期, 提高效率和效益。国内随钻测量和测井技术在温度 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内已实现了静态姿态测量和伽马电阻率的测量, 但在抗高温性、抗振性方面能力不足; 中子密度、探边、地层测试等随钻测量工具刚刚开始试验; 远探、前探等随钻测量工具还处于理论研究、样机研制阶段。这些均需要研究攻关, 以满足地质导向

和随钻评价的需求。

5) 攻关双向通信传输技术。亟需开展连续波、钻杆、光纤等信息传播技术攻关, 突破信息上传瓶颈, 满足旋转地质导向信息快速上传的需求(如图5所示), 否则大量测量数据难以快速上传, 随钻地质导向和随钻地层评价难以实现。

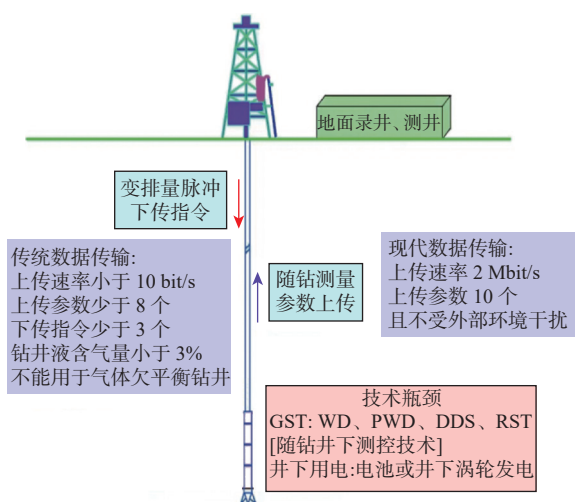


图5 旋转地质导向信息传输参数及速率

Fig.5 Rotary geological steering information transmission parameters and rates

6) 攻关优选井下动力源驱动方式。目前旋转导向系统动力源驱动方式主要有井下发电机驱动、蓄电池驱动和高压钻井液驱动(钻柱内外压差)等, 存在发电机耐温能力受限、蓄电池寿命有限、钻柱内外压差难以实现高造斜率等问题。要升级强化现有动力源驱动方式, 开展新型井下动力源驱动方式的研究, 力争研发出一种功率大、持续时间长、能够实现“超级一趟钻”的动力源。

7) 攻关满足工程地质需求的软件。井下闭环、地下地面双向通信、井场总部远程监控, 这“三环”高速畅联, 相辅相成, 实现数字化智能化闭环控制, 需要多专业紧密协作, 研发一套能综合利用录井数据、工程参数、井下随钻参数以及地震资料、测井资料和邻井资料, 并具有自主学习功能的智能软件。

4 结束语

目前, 滑动导向钻井技术是国内定向井/水平井导向钻井主体技术, 技术水平和应用规模已处于国际领先水平, 在国内油气田开发中发挥着重要支撑作用。但是, 由于滑动导向钻进时, 整个井下钻柱

几乎不能正常转动, 因此还不能彻底解决钻速慢、井身质量差、储层钻遇率低、钻井周期长、综合效益低的突出问题。旋转导向钻井技术具有钻速高、钻井周期短、井眼轨迹控制精确、井身质量好、储层钻遇率高及综合效益好等优点, 已经在定向井/水平井钻井中得到广泛应用, 旋转导向系统已发展至第三代产品。我国旋转导向钻井技术经过多年的快速发展, 研制的推靠式旋转导向系统在国内定向井/水平井钻井中发挥了重要支撑作用。但是, 与国外先进旋转导向系统相比, 国内旋转导向系统在适应性、稳定性、可靠性、抗温性等方面仍有很大差距, 因此, 需要组建融合多学科、多专业技术人员的研发团队, 加强旋转导向理论、关键技术和核心工具的攻关研发, 不断提高旋转导向钻井技术水平, 加快实现我国钻井方式从滑动导向钻井向旋转导向钻井的跨越转变, 以满足我国深层、深海和非常规油气高效勘探开发需求。

致谢: 在论文撰写过程中, 中国石油集团测井有限公司李晓军和范永涛、中国石油集团油田技术服务有限公司杨建永、中国石油集团工程研究院有限公司房平亮和周波等同志给予了大力帮助, 在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

References

- [1] 张绍槐. 现代导向钻井技术的新进展及发展方向[J]. 石油学报, 2003, 24(3): 82-85.
ZHANG Shaohuai. New progress and development direction of modern steering drilling techniques[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(3): 82-85.
- [2] 于文平, 狄勤丰. 滑动导向钻具组合连续导向钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(2): 1-3.
YU Wenping, DI Qinfeng. Continuous steerable drilling technique with Slide-Steering BHA[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(2): 1-3.
- [3] 肖仕红, 梁政. 旋转导向钻井技术发展现状及展望[J]. 石油机械, 2006, 34(4): 66-70.
XIAO Shihong, LIANG Zheng. Development status and prospects of rotary directional drilling technology[J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34(4): 66-70.
- [4] 陈家琦. 滑动导向钻井系统动力学及钻进控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2021.
CHEN Jiaqi. Research on dynamics and drilling control of the slide drilling system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2021.
- [5] 中国石油勘探与生产公司, 斯伦贝谢中国公司. 地质导向与旋转导向技术应用及发展[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
China Petroleum Exploration and Production Corporation, Schlumberger China Company. Application and development of geosteering and rotary steerable systems technique[M]. Beijing: Petroleum

- Industry Press, 2012.
- [6] 中国石油勘探与生产公司, 斯伦贝谢中国公司. 地质导向与旋转导向技术应用及发展 [M]. 2 版. 北京: 石油工业出版社, 2021.
- China Petroleum Exploration and Production Corporation, Schlumberger China Company. Application and development of geosteering and rotary steerable system technologies[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.
- [7] 蒋世全, 李汉兴, 李峰飞, 等. 旋转导向钻井系统研究与实践 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
- JIANG Shiquan, LI Hanxing, LI Fengfei, et al. Research and practice of rotary steerable drilling system[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [8] 高怡, 康思民. 全旋转导向钻井工具测控技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2021.
- GAO Yi, KANG Simin. Measurement and control technology for fully rotating directional drilling tools[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2021.
- [9] IADD. History of rotary steerable technology[EB/OL]. (2023-08-31) [2024-08-14]. <https://irp.edn-website.com/bc36435b/files/uploaded/Gerald%20Heisig%20-%20RSS%20Technical%20Forum%202023.pdf>.
- [10] 中国石油集团测井有限公司. 旋转导向技术全球发展现状分析报告 [R]. 北京: 2022.
- China Petroleum Logging Co., Ltd. Analysis report on the global development status of rotary steering technology[R]. Beijing: 2022.
- [11] 苏义脑, 窦修荣, 高文凯, 等. 旋转导向系统研究现状与发展趋势 [J]. 钻采工艺, 2024, 47(3): 1-8.
- SU Yinao, DOU Xiurong, GAO Wenkai, et al. Research status and development trends of rotary steerable system[J]. *Drilling & Production Technology*, 2024, 47(3): 1-8.
- [12] 秦永和, 曹晓宇, 张志伟, 等. 油气钻采装备技术发展现状与展望 [J]. 前瞻科技, 2023, 2(2): 89-104.
- QIN Yonghe, CAO Xiaoyu, ZHANG Zhiwei, et al. Development status and prospect of oil and gas drilling and production equipment and technologies[J]. *Science and Technology Foresight*, 2023, 2(2): 89-104.
- [13] Offshore Magazine. 2021 rotary steerable systems directory [EB/OL]. (2021-06-01)[2024-08-14]. https://img.offshore-mag.com/files/base/ebm/os/document/2021/06/2106OFF_31_41_RSS_Directory.60c38142ce8e7.pdf?dl=2106OFF_31_41_RSS_Directory.60c38142ce8e7.pdf.
- [14] Offshore Magazine. 2019 rotary steerable drilling systems directory[EB/OL].(2019-04-02)[2024-08-14].https://img.offshore-mag.com/files/base/ebm/os/document/2019/08/2019_RSS_survey.5d684611db5a2.pdf?dl=2019_RSS_survey.5d684611db5a2.pdf.
- [15] Offshore Magazine. 2020 rotary steerable drilling systems directory[EB/OL]. (2020-04-02)[2024-08-14]. https://img.offshore-mag.com/files/base/ebm/os/document/2020/04/2004OFFrss_survey.5ea48e7645df7.pdf?dl=2004OFFrss_survey.5ea48e7645df7.pdf.
- [16] 张辉, 付豪, 秦永和, 等. PDC 钻头对推靠式旋转导向工具的适配性 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(2): 73-80.
- ZHANG Hui, FU Hao, QIN Yonghe, et al. Adaptability of PDC drill bit with push-the-bit rotary steerable tools for inclined drilling[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2023, 47(2): 73-80.
- [17] 秦永和, 范永涛, 陈文辉, 等. 静态推靠式旋转导向控制模型与造斜率预测方法 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 74-80.
- QIN Yonghe, FAN Yongtao, CHEN Wenhui, et al. Static push-the-bit rotary steering control model and build-up rate prediction method[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(4): 74-80.
- [18] WANG Ge, HUANG Wenjun, SHI Xiaolei, et al. Prediction and optimization method of drilling trajectory for push-the-bit rotary steering tools[R]. ARMA 2022-0517, 2022.
- [19] 李根生, 宋先知, 祝兆鹏, 等. 智能钻完井技术研究进展与前景展望 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 35-47.
- LI Gensheng, SONG Xianzhi, ZHU Zhaopeng, et al. Research progress and the prospect of intelligent drilling and completion technologies[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(4): 35-47.
- [20] 曾义金, 王敏生, 光新军, 等. 中国石化智能钻井技术进展与展望 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(5): 1-9.
- ZENG Yijin, WANG Minsheng, GUANG Xinjun, et al. Progress and prospects of Sinopec's intelligent drilling technologies[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2024, 52(5): 1-9.
- [21] JONES S, SUGIURA J, BARTON S. Results from systematic rotary-steerable testing with PDC drill-bits depict the optimal balance between stability, steerability, and borehole quality[R]. SPE 112579, 2008.
- [22] WANG Heng, GUAN Zhichuan, SHI Yucai, et al. Study on build-up rate of push-the-bit rotary steerable bottom hole assembly[J]. *Journal of Applied Science and Engineering*, 2017, 20(3): 401-408.

[编辑 陈会年]