



井壁深穿透电控钻孔技术研究现场试验

刘平全 李磊兵 施禹岑 韩龙

Research and Field Test of Electrically Controlled Sidewall Deep Penetrating Perforating Technology

LIU Pingquan, LI Leibing, SHI Yucen, HAN Long

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021055>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

液力扭转冲击器配合液力加压器的钻井提速技术研究现场试验

Research and Field Test on Drilling Acceleration Technology with Hydraulic Torsional Impactor Combined with Hydraulic Boosters

石油钻探技术. 2020, 48(3): 58–62 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020037>

免钻式膨胀管补贴技术研究现场试验

Research and Field Test of Non-Drilling Plug Expandable Casing Patching Technology

石油钻探技术. 2017, 45(5): 73–77 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201705013>

深井抗高温泡沫钻井液技术研究现场试验

Research and Field Testing of High Temperature Resistant Foam Drilling Fluid in Deep Wells

石油钻探技术. 2018, 46(6): 47–53 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018139>

顺北油气田超深碳酸盐岩储层深穿透酸化技术

Deep Penetration Acid-Fracturing Technology for Ultra-Deep Carbonate Oil & Gas Reservoirs in the Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2019, 47(3): 140–147 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019058>

双级双速钻井工具设计与现场试验

The Design and Field Testing of Two-Stage and Two-Speed Drilling Tools

石油钻探技术. 2019, 47(1): 59–64 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019010>

顺北油气田主干断裂带深穿透酸化技术

Acidizing Technology for Deep Penetration in Main Fault Zone of Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2020, 48(2): 82–87 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020014>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2021055

引用格式: 刘平全, 李磊兵, 施禹岑, 等. 井壁深穿透电控钻孔技术与现场试验 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 55-61.

LIU Pingquan, LI Leibing, SHI Yucen, et al. Research and field test of electrically controlled sidewall deep penetrating perforating technology [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 55-61.

井壁深穿透电控钻孔技术与现场试验

刘平全¹, 李磊兵¹, 施禹岑², 韩 龙¹

(1. 中国石油集团长城钻探工程有限公司工程技术研究院, 辽宁盘锦 124010; 2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 现有水力钻孔技术虽然弥补了传统火药射孔穿透距离短、有压实效应等不足, 但施工时需要油管或连续管配合, 作业周期长、成本高, 而且仅依靠地面泵压信号难以直接准确监测施工进度。针对这一问题, 进行了井壁深穿透电控钻孔技术研究。优选直流电机代替高压水泵作为施工的能量来源; 采用电缆悬吊方式代替油管或连续管传送钻孔工具, 通过电缆传输电能和发送控制命令控制钻孔作业; 研制实时监测系统, 以及时准确地监测地层钻进过程, 形成了井壁深穿透电控钻孔系统。地面试验和现场试验证明, 该技术可钻入地层 2.00 m 以上, 形成直径 20.0~30.0 mm 的孔道, 其监测系统通过识别和记录井下霍尔传感器在地层钻进时产生的脉冲电信号, 可及时准确地计算出实际钻孔长度。研究结果表明, 井壁深穿透电控钻孔技术采用电缆传送, 高效、快速、成本低, 很好地弥补了传统火药射孔的不足, 为沟通改造近井地层提供了一种新方法; 同时, 该技术的监测系统可在施工时对钻进长度等参数实时监测, 解决了现有水力钻孔技术无法监测施工进度问题。

关键词: 电控; 钻孔; 深穿透; 井壁; 近井地层; 现场试验

中图分类号: TE257⁺.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)03-0055-07

Research and Field Test of Electrically Controlled Sidewall Deep Penetrating Perforating Technology

LIU Pingquan¹, LI Leibing¹, SHI Yucen², HAN Long¹

(1. Engineering Technology Research Institute, CNPC Greatwall Drilling Company, Panjin, Liaoning, 124010, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang, 150001, China)

Abstract: Traditional explosive perforation is subject to a short penetration distance and a compaction effect. Although the existing hydraulic perforating technology has remedied the deficiencies, it needs to cooperate with oil tubing or coiled tubing, with a long operation period and a high cost. Also, it is difficult to monitor the construction process directly and accurately only with surface pump pressure signals. With regard to this problem, research was performed on electrically controlled sidewall deep penetrating perforating technology (ECSDPPT). DC motors were selected to replace high-pressure water pumps as the energy source. Perforating tools were suspended by electric cables for transmission instead of oil tubing or coiled tubing, and the cables also transmitted electrical energy and delivered commands to control perforating operations. A real-time monitoring system was developed to monitor the drilling process into formations timely and accurately. As a result, an electrically controlled sidewall deep penetrating perforating system was built. Ground and field tests prove that the ECSDPPT enables the drilling into formations by over 2.00 m, forming a borehole with a diameter of 20.0–30.0 mm. The monitoring system can accurately calculate the actual perforating length in time by identifying and recording the electric pulse signals from a downhole Hall sensor during formation drilling. The research results demonstrate that the ECSDPPT relying on cable transmission is fast, efficient and low-cost. It overcomes the shortcomings of conventional explosive perforation, providing a new method for connecting and reforming near wellbore formations. In addition, the monitoring system can record the drilling length and other parameters in real time during construction, effectively solving the failure of the existing

收稿日期: 2020-09-29; 改回日期: 2021-03-22。

作者简介: 刘平全 (1985—), 男, 山东泰安人, 2007年毕业于山东交通学院机械专业, 2010年获中国石油大学 (华东) 机械工程专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事深穿透钻孔技术方面的研究工作。E-mail: liupingquan@126.com。

通信作者: 李磊兵, llbupc@126.com。

基金项目: 中国石油集团油田技术服务有限公司科技项目“深穿透电控钻孔技术研究” (编号: 2018T-005-006) 资助。

hydraulic perforating technology in monitoring the working process.

Key words: electric control; perforating; deep penetrating; sidewall; near wellbore formation; field test

射孔完井是目前应用最广泛的完井技术,但其存在以下不足:1)射孔弹射入地层的深度有限,仅有0.50~1.50 m^[1-2],不能穿透近井污染带^[3];2)存在压实效应,导致压实区域的岩石渗透率下降75%~70%^[4];3)炮弹射孔易破坏套管和环空水泥环。

为了弥补射孔完井的不足,近年来国内外在试验水力深穿透井壁钻孔技术,试图将井筒与油层有效连通;但施工时基本都采用水力驱动方式^[5-6],需要油管或连续管配合,井下工具开窗、钻进动作切换都依靠地面泵压水力信号,动作指令不准确,对钻孔进尺、钻孔速度等根据水压波动变化情况分析、判断,无法直接监测,而且作业周期长、成本高,制约了深穿透钻孔技术的应用。

针对上述问题,笔者提出了井壁深穿透电控钻孔的技术思路^[7]。该技术不需要油管传送,仅通过电缆下入钻孔器到井内油层位置,然后由地面系统通过电缆传输电能和发送控制命令,井下钻孔器自带电机和液压动力系统,按照地面发出的指令带动柔性钻杆和微型钻头钻入油层,钻出长2.00 m以上、直径20.0~30.0 mm的清洁泄油孔道。采用该技术,不产生压实效应,可使井筒与油层连通。

1 井壁深穿透电控钻孔系统

1.1 系统结构及功能

井壁深穿透电控钻孔系统主要由地面控制器、电缆和井下钻孔器3部分组成,如图1所示。

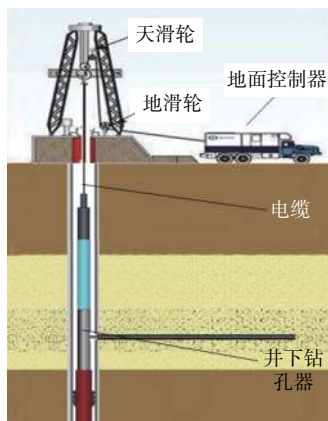


图1 井壁深穿透电控钻孔系统结构

Fig.1 Structure of the electrically controlled sidewall deep penetrating perforating system

地面控制器主要有3个功能:1)实现人机交互,工作人员通过它向井下钻孔器发送控制信号;2)接收井下钻孔器上传的监测信号并解码显示;3)将井场的电能转换成仪器工作电源,通过电缆传送至井下钻孔器。

电缆为测井电缆,有足够的抗拉强度、耐高温和载流能力。

井下钻孔器是整个系统的核心部分,接收地面控制信号,并按指令驱动井下电机和液压系统运行,将扭矩和钻压施加到终端的柔性钻杆和微型钻头上,微型钻头旋转切削破岩,钻入地层,形成清洁泄流孔道。

1.2 工作原理

井壁深穿透电控钻孔系统作业时,通过电缆将井下钻孔器悬吊传送到目标层位,通过深度校定、工具锚定和地层钻进完成施工,如图2所示。

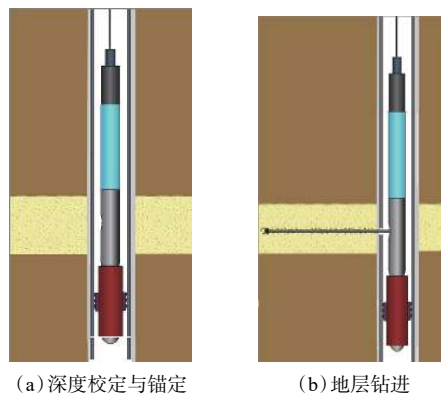


图2 井壁深穿透电控钻孔系统的工作原理

Fig.2 Working principle of the electrically controlled sidewall deep penetrating perforating system

1)深度校定。通过井下钻孔器自带的测井模块测量并校定当前深度。

2)工具锚定。完成深度校定及调整后,井下钻孔器按照地面指令进行锚定动作,锚爪张开并卡住套管内壁,将井下钻孔器和套管固定,防止施工过程中井下钻孔器发生移动,为后续施工提供稳定的环境。

3)地层钻进。井下钻孔器按照地面指令,驱动柔性钻杆和微型钻头旋转钻穿套管、钻入油层,在油层内钻出长于2.00 m、直径20.0~30.0 mm的孔道,然后发出指令,将柔性钻杆和微型钻头收回到

工具内,完成一个孔眼的施工。多孔眼施工时,重复上述流程。

2 关键工具设计

实施电控钻孔的关键工具是井下钻孔器,该工具主要由机械系统、动力系统、监测系统、液压系统和控制系统构成。为使该关键工具满足要求,对各构成系统进行了设计。

2.1 机械系统

机械系统主要由驱动液缸、液压活塞、柔性钻杆和微型钻头等组成,用来钻进地层及收回柔性

钻杆和钻头,如图 3 所示。工作时,液压系统向加压器无杆腔内注入油,油压推动活塞和活塞杆下移,并将此推力施加到扭矩传动器,进一步传递到柔性钻杆、微型钻头上,在此推力下,柔性钻杆和微型钻头沿转向器垂直切入地层,形成钻压;然后,扭矩传动器运行,电机带动花键轴以及柔性钻杆、微型钻头旋转,微型钻头在钻压和扭矩作用下垂直井壁切削钻孔;钻成一个孔眼后,电磁阀控制高压油流进入加压器的无杆腔,致使活塞杆回收上移,带动扭矩传动器及柔性钻杆、微型钻头收回,直至微型钻头退回到转向器内,停止回收和旋转动作。

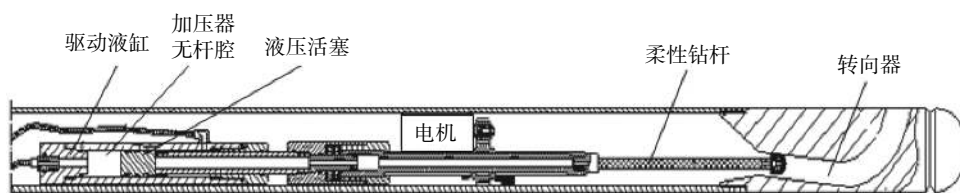


图 3 井下钻孔器机械系统的结构

Fig.3 Mechanical system structure of downhole drilling tool

2.2 动力系统

动力系统是井下钻孔器的能量来源,通过对钻进地层时所受阻力进行力矩分析,确定动力系统所需电机功率,选择合适的电机,驱动柔性钻杆实现井壁深穿透钻孔。

2.2.1 钻进阻力矩分析与电机功率确定

采用钻孔静摩阻力模型分析柔性钻杆带动钻头切削岩层时的阻力,模型如图 4 所示(F 为柔性钻杆受到的钻压, N ; T 为柔性钻杆受井下钻孔器作用而产生的阻力扭矩, $N \cdot m$; F_k 为岩层孔壁在接触点对柔性钻杆的支撑力, N ; T_b 为钻头切削地层产生的阻力扭矩, $N \cdot m$; T_p 为柔性钻杆和孔眼内壁形成的阻力扭矩, $N \cdot m$; 蓝色阴影部分代表被切削的岩层)。

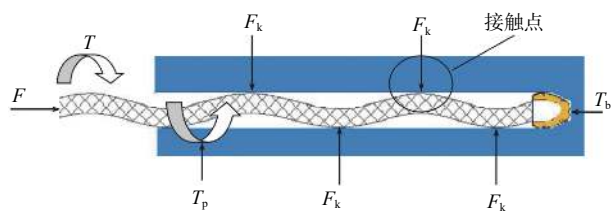


图 4 钻孔静摩阻力模型

Fig.4 Model of static friction of perforating

由图 4 可知,以柔性钻杆为研究对象进行分析,其所受阻力扭矩 $T=T_p+T_b$ 。其中, T_b 取决于钻头结

构形式、地层类型、切削深度和钻压,该部分是有效功耗,且占比较小; T_p 是由柔性钻杆和孔壁的接触点形成的,对单个接触点进行受力分析,可表示为图 5 形式(图 5 中, α 为柔性钻杆和孔眼的夹角, $(^\circ)$, 取决于环形空间大小)。

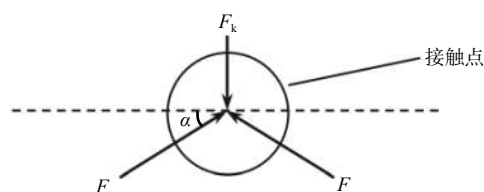


图 5 接触点受力分析示意

Fig.5 Analysis of force at the contact point

单个接触点所受摩擦阻力为:

$$F_n = f_s F_k = 2f_s F \sin \alpha \quad (1)$$

式中: F_n 为单个接触点的摩擦阻力, N ; f_s 为接触点的摩擦系数,取决于柔性钻杆和地层的性质。

则柔性钻杆的阻力扭矩为:

$$T_p = m R F_n = 2m R f_s F \sin \alpha \quad (2)$$

式中: m 为接触点数量,取决于柔性钻杆刚度; R 为柔性钻杆半径, m 。

分析可知, α 和 m 是可以优化的,方法是优化匹配钻头与孔眼的间隙和提高柔性钻杆的刚度。以滑

块柔性钻杆为例,提高柔性钻杆刚度,即在转向器能顺利通过的前提下,尽可能加长单节钻杆的长度。

根据钻进方案,取钻头外径 20.0 mm,柔性钻杆外径 17.0 mm,钻压 1 200 N,单节钻杆长度 25.0 mm,柔性钻杆和水泥摩擦系数为 0.47(实测),计算得到克服静阻力矩所需要的扭矩为 34 N·m。

柔性钻杆钻进时的扭矩由电机提供,因此必须保证电机的输出扭矩大于柔性钻杆钻进时的阻力扭矩,即电机的功率要足够大。根据扭矩与电机功率的计算关系,有:

$$P = \frac{Tn}{9550\eta} \quad (3)$$

式中: P 为电机功率, W; n 为电机转速,取 400 r/min; η 为电机效率,取 80%。

最后得出所需要的电机理论功率为 1 780 W。

2.2.2 电机优选与效率测试

目前井下钻孔器基本采用 2 种电机:交流电机和无刷直流电机^[8]。随着无刷直流电机技术不断成熟,越来越多的仪器改用无刷直流电机。与交流电机相比,无刷直流电机具有以下优点:

1)效率高。井温 120~150 ℃ 条件下,无刷直流电机效率可达 80% 以上,而交流电机只能达到 60% 左右,即输出功率相同时,无刷直流电机所需输入功率更低,采用无刷直流电机的仪器总供电电流更小,有利于通过几千米电缆向井下传输电能。

2)功率密度大。同样功率条件下,无刷直流电机的体积仅为交流电机的 1/3~1/2,更适用于井下钻孔器。

因此,选用无刷直流电机作为井下钻孔器的电机,并对该电机进行了效率测试,结果见表 1。

表 1 无刷直流电机效率测试结果
Table 1 Efficiency tests of brushless DC motors

测试序号	电压/V	电流/A	输入功率/W	转速/(r·min ⁻¹)	输出功率/W	电机效率, %
1	600	1.6	976	400	902	92
2	600	2.5	1 510	400	1 390	92
3	600	3.5	2 106	400	1 913	91

由表 1 可知,无刷直流电机的效率可达 90% 以上,高于理论计算时所选取的电机效率 80%,足以保证钻进地层所需。

2.2.3 柔性钻杆壳体传动设计

井壁深穿透电控钻孔时,柔性钻杆和微型钻头通过转向器从垂直方向转到垂直井壁的水平方向,

进而钻穿套管和钻入地层。柔性钻杆由多节滑块壳体依次相连而成,前后相邻 2 节滑块壳体之间可以存在轴向夹角,以便适应转向器轨迹曲率变化,实现转向,如图 6 所示。但在试验中,容易出现柔性钻杆扭断现象,这也是柔性钻杆容易损坏的主要原因。为解决这一重要问题,对柔性钻杆壳体(见图 7)进行了理论分析^[9]:取单组壳体进行分析,假设所取相邻 2 节滑块壳体受导向器轨迹限制,形成夹角 β (如图 8 所示),在导向器内旋转时,会出现 2 种极限状态(如图 9 所示)。图 8、图 9 中: v_a 为 a 点的运动速度, m/s; v_b 为 b 点的运动速度, m/s; ω_i 为输入轴的角速度, rad/s; ω_o 为输出轴的角速度, rad/s; L 为连杆长度, m; β 为输出轴和输入轴角度差, (°)。

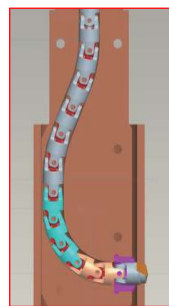


图 6 柔性钻杆示意

Fig.6 Schematic diagram of the flexible drill pipe



图 7 柔性钻杆壳体

Fig.7 Shell of the flexible drill pipe

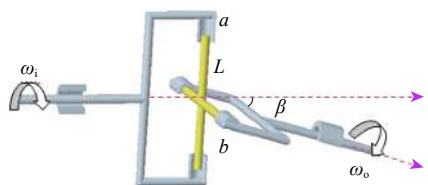


图 8 柔性钻杆壳体运动示意

Fig.8 Schematic diagram of shell motion of the flexible drill pipe

当柔性钻杆处于图 9(a)所示状态时, a 点速度与 b 点速度相等,即:

$$v_a = v_b \quad (4)$$

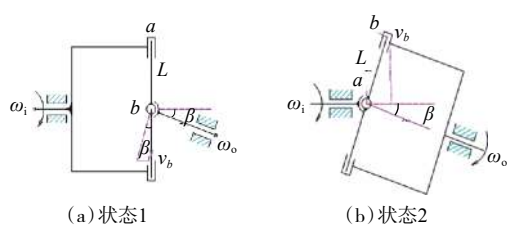


图 9 柔性钻杆壳体运动分析

Fig. 9 Shell motion analysis of the flexible drill pipe

$$\text{其中} \quad v_a = \omega_i L \quad (5)$$

$$v_b = \omega_o L \cos \beta \quad (6)$$

则由式(4)—式(6)可得:

$$\omega_o = \frac{\omega_i}{\cos \beta} \quad (7)$$

单节柔性钻杆旋转 90°后到达图 9(b)所示状态, 此时:

$$\omega_o = \frac{v_b}{L} \quad (8)$$

b 点与输入轴 i 的垂直距离是 $L \cos \beta$, 即:

$$v_b = \omega_i L \cos \beta \quad (9)$$

最后得出:

$$\omega_o = \frac{v_b}{L} = \omega_i \cos \beta \quad (10)$$

以上分析可知, 由于输入节和输出节不同轴, 当输入节以恒定的角速度 ω_i 转动时, 输出节的速度不是定值, 而是在 $\omega_i \cos \beta$ 与 $\omega_i / \cos \beta$ 之间周期性变化, 且变换周期为 90°。电机匀速带动柔性钻杆转动, 切削地层时, 柔性钻杆输出端实际为变速运动, 切削过程中为交变载荷, 故钻杆的破坏是由交变应力引起的疲劳破坏, 且易发生在两轴夹角 β 较大处, 这与试验所得的损坏结果是一致的。

依据理论计算结果, 进行以下改进: 1) 优化转向器轨迹, 尽可能缩小 β 角; 2) 选择柔性钻杆的材料及热处理方式时, 以抗疲劳破坏为主要目的。优化改进后, 可以解决柔性钻杆疲劳损坏的问题^[10]。

2.3 监测系统

利用水力深穿透钻孔技术钻孔时, 只能根据注水量和水压的变化情况来判断进尺和钻速等参数, 无法直接监测, 因此效率和准确率^[11]。为此, 在井壁深穿透电控钻孔系统的井下钻孔器中设计了一种监测系统, 以实时有效地监测进尺、钻速等参数, 以便对井下工况做出及时准确的判断。

监测系统的基本结构如图 10 所示, 其工作原理是: 在电机驱动下, 传动轴旋转, 并沿着其轴线方向

伸出, 将扭矩和钻压依次传递到导锥、联轴节和柔性钻杆上, 最终由柔性钻杆带动钻头旋转^[12], 钻入油层。其中, 滑环是一个环形金属部件, 安装在联轴节的轴颈上, 其内径大于联轴节轴颈, 可以自由旋转, 左右两侧分别被导锥端面和联轴节的轴肩限位, 轴向移动速度和传动轴的伸出速度一致。滑环通过螺钉和一条细长形滑块固定连接, 滑块上等距离安装有一组磁柱, 工作时滑块随滑环移动, 当滑块上的磁柱经过霍尔传感器^[13]时, 霍尔传感器会产生脉冲电信号, 并将该信号传入实时监测电路^[14], 通过识别和累计脉冲信号, 可计算出进尺。

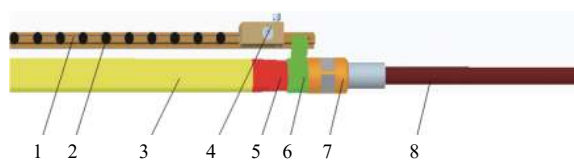


图 10 监测系统结构

Fig.10 Structure of the monitoring system

1.滑块; 2.磁柱; 3.传动轴; 4.霍尔传感器;
5.导锥; 6.滑环; 7.联轴节; 8.柔性钻杆

2.4 液压系统

液压系统的作用是建立油压, 为钻孔和锚定提供液压动力, 其工作原理如图 11 所示: 电机驱动液压泵运行, 建立油压, 经溢流阀形成 7~10 MPa 油压, 一支油路经电磁换向阀进入钻孔机构, 实现地层钻孔的推进和复位; 另一支油路经电磁换向阀进入锚定机构, 控制锚定和解封。

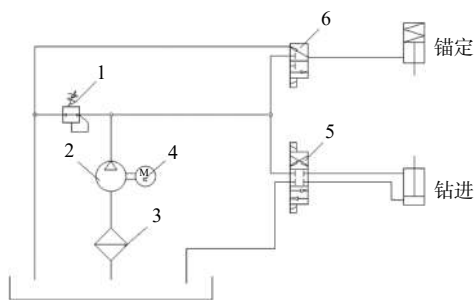


图 11 液压系统工作原理

Fig.11 Working principle of the hydraulic system

1.溢流阀; 2.液压泵; 3.过滤器; 4.电机;
5.钻进电磁阀; 6.锚定电磁阀

2.5 控制系统

控制系统是井下钻孔器的“大脑”, 通过接受地面指令控制各电机、液压泵、电磁阀运行, 实施校深、锚定、地层钻进和解封等作业。此外, 控制系统接收传感器发送的压力、温度、进尺等的信号, 进行处理后反馈到地面, 其工作原理如图 12 所示。

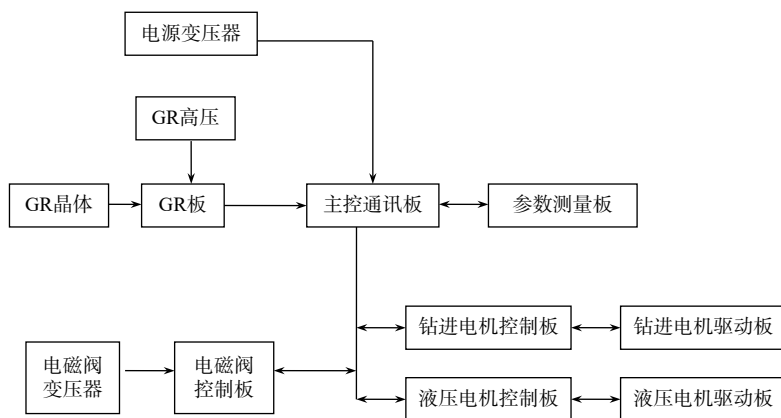


图 12 控制系统工作原理示意

Fig.12 Flow chart of the control system

3 现场试验

2019—2020 年, 井壁深穿透电控钻孔技术在辽河

油田某地热井改造区块 2 口井进行了现场试验。其中, J31 井钻孔 18 个, J20 井钻孔 12 个, 最大穿深大于 2.00 m, 直径 20.0~30.0 mm。现场试验后, 与 2 口采用其他完井措施的邻井进行了效果对比, 结果见表 2。

表 2 试验井与邻井完井效果对比

Table 2 Comparison between completion results of test wells and adjacent wells

井号	完井方式	施工井段/m	有效层厚度/m	水量/m ³	单位厚度产水量/m ³
J31	电控钻孔	2 352.00~2 397.00	45.00	30.3	0.673
J20	电控钻孔	2 021.00~2 045.00	24.00	19.1	0.796
J-W1-02	筛管完井	2 092.00~2 374.00	165.00	50.0	0.303
J2-9-12	射孔完井	2 065.00~2 076.00 2 111.00~2 160.00	60.00	19.2	0.320

由表 2 可知: J31 井和 J20 井的单位厚度产量分别是邻井 J-W1-02 井的 2.2 倍和 2.6 倍, 是邻井 J2-9-12 井的 2.1 倍和 2.5 倍, 可见效果非常显著。这说明, 井壁深穿透电控钻孔技术为近井地层改造提供了一种新的技术途径^[15], 且增产效果明显, 值得推广应用。

4 结论与建议

1) 通过设计井下钻孔器驱动液缸、液压活塞等部件, 实现了柔性钻杆与钻头的平稳安全伸出和回收; 通过分析钻进地层时所受阻力扭矩, 确定了井下钻孔器所需电机功率, 优选出了合适的直流电机, 实现了机械、液压等系统的高效驱动; 采用电缆悬吊传送钻孔仪器入井, 能够提高井壁深穿透电控钻孔作业效率。

2) 研制的专用监测系统, 可在施工时对钻进长度、钻进深度等参数进行实时监测, 解决了传统水

力钻孔技术效率低、施工过程中监测不及时、不准确等问题。设计了带有 2 条油路的液压系统, 可以建立 7~10 MPa 油压, 为地层钻进和锚定、解封提供液压动力。

3) 研制了井下钻孔器的控制系统, 该系统通过接受地面指令, 可以控制各电机、液压泵、电磁阀正常运行, 实现校深、锚定、地层钻进和解封等作业。

4) 采用机电液一体化的井壁深穿透电控钻孔技术, 可成功钻入地层 2.00 m 以上, 形成直径 20.0~30.0 mm 的孔道, 实现储层增产。该技术为近井地层沟通改造提供了一种新途径, 建议进一步加强井壁深穿透电控钻孔技术的试验、完善和配套研究, 为推广应用奠定基础。

参 考 文 献

References

- [1] 李军, 毕胜宇, 柳贡慧, 等. 低渗透岩芯实弹射孔实验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(1): 102-106.

- LI Jun, BI Shengyu, LIU Gonghui, et al. Study on perforation test of low permeability core with shaped charge[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(1): 102–106.
- [2] 张艺耀, 李进, 冯硕, 等. 自清洁射孔技术在渤海油田的应用[J]. 石油矿场机械, 2020, 49(4): 69–73.
- ZHANG Yiyao, LI Jin, FENG Shuo, et al. Application of self-cleaning perforation technology in Bohai Oilfield[J]. Oil Field Equipment, 2020, 49(4): 69–73.
- [3] 范翔宇, 王俊瑞, 夏宏泉, 等. 基于灰色系统理论的钻井液污染储层深度预测[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 98–104.
- FAN Xiangyu, WANG Junrui, XIA Hongquan, et al. Drilling fluid's damage depth prediction method based on the grey system theory[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(3): 98–104.
- [4] 李东传, 唐国海, 孙新波, 等. 射孔压实带研究[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 112–114.
- LI Dongchuan, TANG Guohai, SUN Xinbo, et al. A study on perforation crushed-zone[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(5): 112–114.
- [5] 任建民. 超短半径水平井喷射钻井机理[J]. 石油机械, 1994, 22(10): 50–55.
- REN Jianmin. Jet drilling mechanism of ultra-short radius horizontal well[J]. China Petroleum Machinery, 1994, 22(10): 50–55.
- [6] 张锦宏. 中国石化石油工程技术现状及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 9–17.
- ZHANG Jinhong. Current status and outlook for the development of Sinopec's petroleum engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 9–17.
- [7] 中国石油集团长城钻探工程有限公司. 深穿透电控钻孔装置: CN201810623247.7 [P]. 2018-11-30.
- CNPC Greatwall Drilling Company. Electrically controlled deep penetrating perforating device: CN201810623247.7 [P]. 2018-11-30.
- [8] 宗世伟, 徐东后, 李伟, 等. 无刷直流电机在旋转式井壁取芯仪中的应用[J]. 石油仪器, 2013, 27(6): 5–6, 9.
- ZONG Shiwei, XU Donghou, LI Wei, et al. Application of brushless DC motor in rotary wall coring apparatus[J]. Petroleum Instruments, 2013, 27(6): 5–6, 9.
- [9] 宋伟刚. 机器人学: 运动学、动力学与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 50–70.
- SONG Weigang. Robotics: kinematics, dynamics and control[M]. Beijing: Science Press, 2007: 50–70.
- [10] 罗敏, 徐亭亭, 贾丽, 等. 超短半径水平井柔性钻杆非线性力学分析[J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(7): 21–24.
- LUO Min, XU Tingting, JIA Li, et al. Nonlinear mechanics analysis of flexible drill rod in ultra short radius horizontal well[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(7): 21–24.
- [11] 张继峰, 刘忠和, 朱再思, 等. 穿透射孔技术最新发展及应用[J]. 石油机械, 2002, 30(10): 68–70.
- ZHANG Jifeng, LIU Zhonghe, ZHU Zaisi, et al. The latest development and application of hydraulic deep penetration technology[J]. China Petroleum Machinery, 2002, 30(10): 68–70.
- [12] 阮海龙, 纪卫军, 沈立娜, 等. 针对复杂地层金刚石钻头的改进与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(1): 67–69.
- RUAN Hailong, JI Weijun, SHEN Lina, et al. Improvement and application of diamond bit for drilling in complex formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(1): 67–69.
- [13] 张斯其. 霍尔传感器电机测速综合改进技术研究[J]. 微特电机, 2018, 46(5): 31–34.
- ZHANG Siqi. Research on hall sensor motor speed improvement technology[J]. Small & Special Electrical Machines, 2018, 46(5): 31–34.
- [14] 郝晓剑. 测控电路设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 136–152.
- HAO Xiaojian. Design and application of measurement and control circuit[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2017: 136–152.
- [15] 刘平全. 径向水平井技术发展及工具特点[J]. 石油矿场机械, 2018, 47(1): 23–27.
- LIU Pingquan. Design and operation of descaling device used for tubing string[J]. Oil Field Equipment, 2018, 47(1): 23–27.

[编辑 令文学]