

旋转导向井下工具控制系统设计及室内试验

刘新华,董广华,赵洪山,杨全进

(中国石化胜利石油管理局钻井工艺研究院,山东东营 257017)

摘要:旋转导向钻井系统在长水平段水平井、大位移井、分支井等复杂结构井的钻井过程中,可以消除粘滑卡钻,携岩效果好,具有显著提高机械钻速、减少井下故障、降低钻井成本的优势。中国石化胜利油田钻井工艺研究院与美国 AGP 公司合作开发了旋转导向井下工具系统,该系统由井下专用螺杆和地面转盘双动力驱动,通过控制导向翼肋的定向支出来控制井眼轨迹。其导向和非导向状态及每个导向翼肋的支出均采用独立电磁阀控制,既保证了系统的可靠性,又保证了控制精度,并且简化了控制方法。井下专用螺杆驱动内部心轴不仅给钻头提供动力,还给液压系统提供动力。室内测试证明,该系统控制方法简单可靠,可实现性强,为以后的实际应用推广提供了依据。介绍了旋转导向井下工具系统的整体设计方案,对其控制系统及各部分的结构、工作原理进行了详细研究。

关键词:旋转导向系统 导向翼肋 电磁阀 控制精度 井眼轨迹控制

中图分类号:TE921⁺.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)05-0086-05

Design and Laboratory Test of Control System for Rotary Steering Motor

Liu Xinhua, Dong Guanghua, Zhao Hongshan, Yang Quanjin

(Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administration, Sinopec, Dongying, Shandong, 257017, China)

Abstract: During drilling a long horizontal-section well, an extended reach well and multilateral wells, rotary steering system can improve drilling speed, reduce downhole accidents and decrease drilling cost greatly because it can prevent sticking and slipping, and have a good result to carry cuttings. The paper has presented the whole project of developed rotary steering motor(RSM), the structure and working principle of RSM control system were also be studied in detail. Rotary steering tool is driven by both downhole motor and rotary table. Well trajectory can be effectively controlled by adjusting steering pad. Steering or non-steering status and each pad are controlled by using independent electromagnetic valves, which guarantees reliability and control accuracy of RSM, also simplifies the control method. Downhole motor provides power for bit by driving inner mandril, and provides power for hydraulic system at the same time. The indoor tests show that control method of this system is simple and reliable, and easily carried out, it has laid a foundation for practical application in the future.

Key words: rotary steering motor; steering pad; electromagnetic valve; control accuracy; well trajectory control

滑动式导向钻井工具在定向钻井,特别是在大位移井及长水平段水平井的使用中暴露出不少缺点与不足。旋转导向钻井是 20 世纪 90 年代发展起来的一项自动化钻井新技术。国外钻井实践证明,旋转导向钻井系统不但可以提高钻井速度,减少井下故障的发生,降低钻井成本,而且其旋转钻井过程中调节井斜角和方位角的能力被认为是钻井发展史上的又一次飞跃^[1-6]。目前国外 Baker Hughes、Schlumberger

和 Halliburton 等公司通过各种方式,分别形成了其

收稿日期:2011-01-27; **改回日期:**2011-06-24。

作者简介:刘新华(1967—),女,山东莱州人,1991 年毕业于石油大学(华东)钻井工程专业,高级工程师,主要从事钻井工程相关技术研究。

联系方式:(0546)8786411, zjslxh@sina.com。

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“旋转导向钻井系统工程样机的研制”(编号:2005AA602013)部分研究内容。

各自商业化应用的 PowerDrive SRD、AutoTrak RCLS 和 Geo-Pilot 旋转导向钻井系统。

中国石化胜利石油管理局钻井工艺研究院与美国 APS 公司合作开发了旋转导向井下工具系统。该系统采取旋转导向头和井下专用螺杆相配合的设计方式,其地面转盘和井下专用螺杆双动力驱动模式符合目前国际上旋转导向钻井系统最新发展方向。笔者介绍了所研制的旋转导向井下工具系统的整体设计方案,对其控制系统及各部分的结构、工作原理进行了详细研究,并进行了液压控制功能及其延迟时间的室内测试。

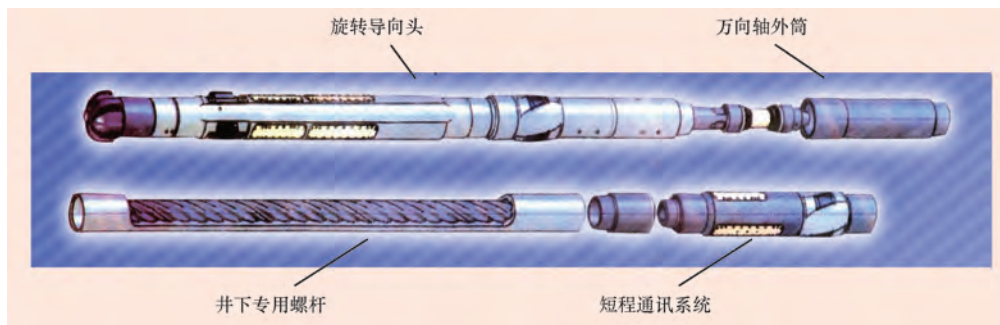


图 1 旋转导向井下工具系统组成

Fig. 1 Components of rotary steering system

钻、携岩效果好等优点外,其地面和井下专用螺杆双动力驱动工作模式为该系统在大位移井、长水平段水平井等复杂结构井的应用提供了更加可靠的动力^[11-12]。

2 控制系统设计

2.1 导向翼肋支出机构设计

导向翼肋支出机构是旋转导向井下工具系统的执行机构,主要由导向翼肋、液压控制系统及电子控制机构等组成,沿钻柱四周共设计 3 个导向翼肋,每个导向翼肋由独立的液压活塞提供动力支出,导向翼肋距钻头约 1.2 m,如图 2 所示。导向翼肋接受来自控制电路的指令,控制导向翼肋顺序支出推靠井壁,使钻头产生侧向力而实现造斜^[13]。

为了提高系统在井下的寿命,其导向工作状态和非导向工作状态分别设计独立的导向控制阀组和非导向控制阀组进行控制。进行导向时,由井下控制电路根据实时采集的系统姿态参数实时调整导向翼肋的伸缩。

导向工作状态控制阀线主要由垫片、阀外壳、线圈、阀杆、固紧螺帽和衬套等组成,如图 3 所示。控

1 整体设计方案

旋转导向井下工具系统主要由旋转导向头、井下专用螺杆、万向轴等组成(见图 1)。旋转导向头由心轴、测控系统、供电系统、短程通讯系统、导向翼肋和外壳等组成,心轴通过一个万向轴与井下专用螺杆的转子相连,外壳与井下专用螺杆的定子相连,并由地面动力系统(转盘)驱动。与前期研究开发的调制式旋转导向钻井井下工具系统^[7-10]相比,旋转导向系统除了具有全旋转工作模式、消除了粘滑卡

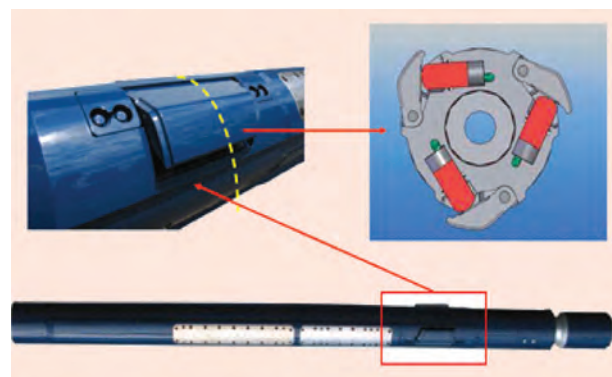
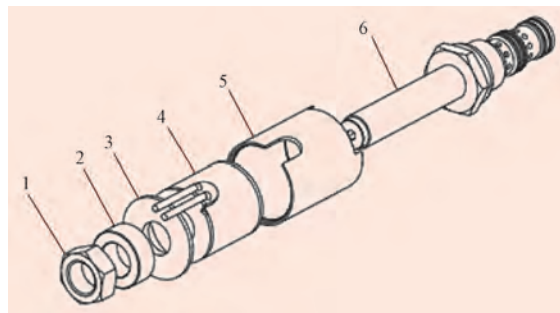


图 2 导向翼肋支出机构

Fig. 2 Rotary steering system pad sketch



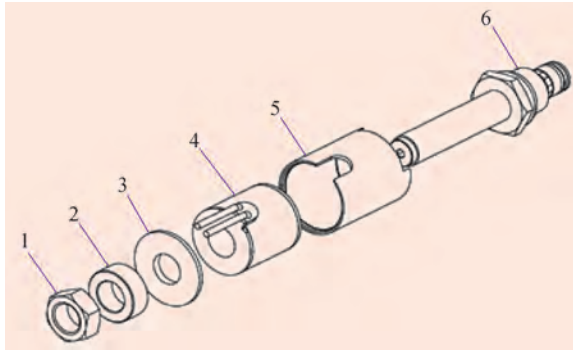
1. 固紧螺帽;2. 衬套;3. 垫片;4. 线圈;5. 阀外壳;6. 阀杆

图 3 导向工作状态控制阀组

Fig. 3 Control valves under the steering condition

制阀与液压系统相连, 阀的导通和关闭根据控制电路的控制指令工作。

非导向工作状态控制阀主要由垫片、阀外壳、线圈、固紧螺帽、衬套和阀心等组成, 如图 4 所示。在非导向工作时, 井下控制电路关闭导向阀组, 打开循环阀组, 导向翼肋在钻具旋转过程中通过井壁的压力将翼肋压回, 实现工具稳斜非导向工作。



1. 固紧螺帽; 2. 衬套; 3. 垫片; 4. 线圈; 5. 阀外壳; 6. 阀心
图 4 非导向工作状态控制阀组

Fig. 4 Control valves under the non-steering condition

2.2 测控系统及控制电路设计

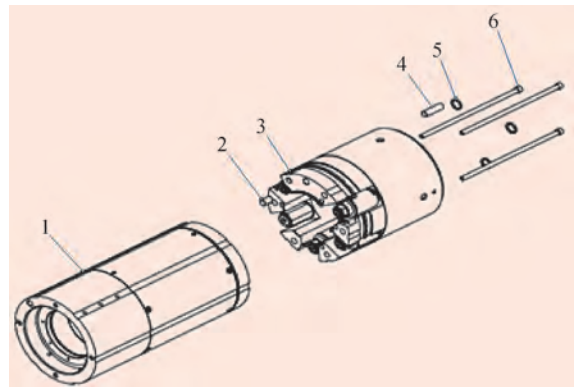
测控系统及控制电路是旋转导向井下工具系统控制中心, 用于系统姿态参数测量、控制方法计算、控制误差修正补偿、控制量输出、井下关键参数存储与回放、自身状态监视以及与 MWD 系统实时通讯等。其中, 系统姿态参数测量传感器对旋转导向井下工具系统的控制精度有很大影响, 它是采用模块化设计、数字接口, 直接与控制电路通过总线方式进行数据交换, 其特点是性能稳定、处理速度快, 外围电路及接口电路简单。传感器首先由磁力计、加速度计测量出地磁参数和重力参数, 经过信号前级整形、放大, 直接进入高速数据采集器, 经由微控制器数字处理, 等待控制电路的通讯命令, 将当前测量到的工具姿态参数按要求时序放到系统总线上, 供控制电路使用, 最终完成控制电路对工具姿态参数的测量。

由于旋转导向工具工况的特殊性, 传统的测量控制方法应用效果不佳。在调研现有旋转导向系统的前提下, 结合旋转导向井下工具系统自身特点, 选用由一个高速两轴磁力计、三轴加速计、高速测控电路和骨架组成的旋转传感器, 利用磁力计测量地磁信息计算得出工具面旋转位置^[14-15]。由于井下测控系统安装在钻柱上, 钻头由钻柱和井下专用螺杆共

同来驱动, 测量过程中, 钻柱转速较低, 因此利用磁性工具面可以满足控制要求, 并且由于测量工具面角的速度快, 底部钻具组合旋转对其不会产生影响。旋转传感器的特性参数如下: 井斜角传感器测量精度 $\pm 0.1^\circ$, 方位角传感器测量精度 $\pm 1^\circ$, 磁工具面角测量精度 $\pm 5^\circ$, 分辨率 1° ; 工作环境参数: 旋转速度 $0\sim 120\text{ r/min}$, 井斜角测量范围 $0^\circ\sim 110^\circ$, 最大工作温度 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.3 水力泵及控制阀组

为能获得足够导向翼肋支出的液压源并保证控制导向翼肋支出的精度, 在旋转导向头内设计了三曲线叶片泵及井下发电机。叶片泵产生的高压液压通过控制阀组由独立的电磁阀提供给导向翼肋液压活塞。泵及液压控制阀组主要由泵体、控制阀组、固定螺丝、定位销以及高压密封圈等组成, 如图 5 所示。



1. 泵体; 2. 定位销; 3. 控制阀组; 4, 6. 固定螺丝;
5. 高压密封圈

图 5 泵及液压控制阀组

Fig. 5 Pump and hydraulic control valves

当旋转导向井下工具系统在井下工作时, 井下专用螺杆通过万向轴带动旋转导向头传动轴高速转动, 依附在传动轴上的发电机及水力泵开始工作, 给旋转导向头提供电力和液力动力, 测控系统实时采集系统姿态参数, 控制电路根据实时姿态参数实时输出控制指令, 电磁阀接受来自控制电路的指令, 控制导向翼肋顺序支出, 实现对井眼井壁的推靠, 使钻头产生侧向力, 从而实现造斜。

3 室内测试

旋转导向头整体组装完成后, 进行了室内的整体测试, 主要测试内容包括液压控制功能测试和延

迟时间测试。测试过程中,旋转导向头由 2 个 V 形块固定在测试台架上,内轴由一个 14.9 kW 的电机和变速齿轮箱驱动,模拟环空压力的加载环安装在导向翼肋上,旋转模拟器套在装有旋转传感器的电子仓位置。用数据线把旋转导向头测控系统和计算机相连,由专门开发的测试软件完成液压控制功能测试和延迟时间测试。

3.1 液压控制功能测试

连接好测试设备后,转动电机,此时依附在旋转导向头传动轴上的水力泵和发电机开始工作,连接指示灯由红变绿,顺序点击测试软件界面上与 3 个导向翼肋相对应的按钮,看相对应的导向翼肋是否正常支出。若正常支出,则液压控制功能正常;若不正常支出,根据出现的问题对控制系统进行调整、改进,直至正常。通过液压控制功能的测试,3 个导向翼肋均正常支出,表明液压控制功能正常。

3.2 延迟时间校正

液压控制功能测试完成后,连接旋转导向头、旋转传感器、旋转传感器架、示波器,控制电机输出转速 120 r/min 不变,旋转传感器转速从 27.1 r/min 一直测试到 121 r/min,测出在不同转速下的液压控制延迟时间(即测控系统发出导向翼肋支出信号到该导向翼肋实际支出所需的时间),结果见表 1。

表 1 第一套旋转导向头工程样机的延迟时间

Table 1 Delay time of steering head engineering prototype

轴转速/ $r \cdot \min^{-1}$	旋转传感器转速/ $r \cdot \min^{-1}$	延迟时间/ms
120	27.1	1 600
120	31.6	1 420
120	39.1	1 130
120	50.1	930
120	59.8	830
120	69.5	720
120	79.9	650
120	89.0	600
120	98.1	560
120	111.3	500
120	121.0	480

从表 1 可以看出,随着钻具转速的增加,系统延迟时间逐渐减小。对试验数据进行回归,得出系统延迟时间回归曲线方程 $y = 2.32775x^2 - 3.42023 \times$

$10^{-2}x + 1.59865 \times 10^{-4}$ (式中: x, y 分别为旋转传感器转速及系统延迟时间),然后根据回归结果修正旋转导向头控制芯片编码,再次测量修正后不同转速下的液压控制延迟时间。虽然经过延迟校正,但系统的测量误差是不可避免的,通过大量试验测量得出,系统误差控制在 5 ms 之内。

4 结 论

1) 旋转导向井下工具系统采用转盘和井下专用螺杆的双动力驱动设计,实现了全旋转工作模式,消除了粘滑卡钻等井下故障的发生,井下安全性更好,在大位移井、长水平段水平井等复杂结构井的应用中能够提供更加可靠的动力。

2) 通过独立电磁阀控制导向翼肋支出属于旋转导向系统的独创性设计。

3) 旋转导向头整体组装完成后,需进行室内液压控制功能测试和延迟时间测试,以确保旋转导向井下工具系统在井下的工作状态。通过对系统延迟时间的校验,可以认为导向翼肋的伸出和控制信号达到了完全同步,这样对提高系统的控制精度能够起到良好的效果。

参 考 文 献

- [1] 狄勤丰,张绍槐. 旋转导向钻井系统控制井眼轨迹机理研究[J]. 石油钻探技术,1998,26(3):52-54.
Di Qinfeng,Zhang Shaohuai. Studies of rotary steering drilling system for hole trajectory control[J]. Petroleum Drilling Techniques,1998,26(3):52-54.
- [2] Sandro Poli, Franci Donaco, Joachim Oppelt, et al. Advanced tools for advanced wells: rotary closed-loop drilling system-results of prototype field testing[J]. SPE Drilling & Completion, 1998,13(2):52-54.
- [3] 孙铭新,韩来聚,李作会. 静态偏置推靠钻头式旋转导向钻井系统介绍[J]. 石油矿场机械,2003,32(6):4-7.
Sun Mingxin,Han Laiju,Li Zuohui. Introduction of static bias push-the-bit rotary navigational system[J]. Oil Field Equipment,2003,32(6):4-7.
- [4] 熊继有,温杰文,荣继光,等. 旋转导向钻井技术研究新进展[J]. 天然气工业,2010,30(4):87-90.
Xiong Jiyu,Wen Jiewen,Rong Jiguang,et al. New progress in the research of rotary steerable drilling technology[J]. Natural Gas Industry,2010,30(4):87-90.
- [5] 胡金艳,周静,付鑫生. 用可控偏心器实现井眼轨迹的闭环控制[J]. 天然气工业,2002,22(6):58-60.
Hu Jinyan,Zhou Jing,Fu Xincheng. Realizing hole trajectory closed-loop control by controllable decentralizer[J]. Natural

- Gas Industry, 2002, 22(6): 58-60.
- [6] 胡金艳, 周静, 尚海燕, 等. 智能旋转导向工具核心控制器的仿真研究[J]. 石油钻探技术, 2002, 30(6): 39-41.
Hu Jinyan, Zhou Jing, Shang Haiyan, et al. Simulation study on the core controller of the intelligent rotary steering tool[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002, 30(6): 39-41.
- [7] 韩来聚, 孙铭新, 狄勤丰. 调制式旋转导向钻井系统工作原理研究[J]. 石油机械, 2002, 30(3): 7-9, 35.
Han Laiju, Sun Mingxin, Di Qinfeng. Principle of power drive rotary steering drilling system[J]. China Petroleum Machinery, 2002, 30(3): 7-9, 35.
- [8] 狄勤丰, 张绍槐. 一种旋转导向工具设计方案及其旋转导向功能的实现[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(3): 15-19.
Di Qinfeng, Zhang Shaohuai. A kind of design proposal for rotary steering tool and fulfillment of its rotary steering function[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1998, 20(3): 15-19.
- [9] 薛启龙, 韩来聚, 杨锦舟, 等. 旋转导向钻井稳定平台控制系统仿真研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4): 10-14.
Xue Qilong, Han Laiju, Yang Jinzhou, et al. Study on controlling simulation system for stabilizing platform in rotary steering drilling system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 10-14.
- [10] 谢海明, 周静, 岳远瞩. 旋转导向钻井的导向动力系统研究[J]. 钻采工艺, 2010, 33(4): 5-7.
Xie Haiming, Zhou Jing, Yue Yuanzhu. Research on the power system used for rotary navigation drilling device[J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(4): 5-7.
- [11] 张绍槐, 狄勤丰. 用旋转导向钻井系统钻大位移井[J]. 石油学报, 2000, 21(1): 76-80.
Zhang Shaohuai, Di Qinfeng. Petroleum engineering drilling extended reach well with rotary steering drilling system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(1): 76-80.
- [12] 汤楠, 霍爱清, 汪跃龙, 等. 旋转导向钻井系统下行通讯接收功能的开发[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 157-160.
Tang Nan, Huo Aiqing, Wang Yuelong, et al. Development of downward communication receiving function in rotary steerable drilling system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 157-160.
- [13] 程载斌, 姜伟, 蒋世全, 等. 旋转导向系统三翼肋偏置位移矢量控制方案[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 676-683.
Cheng Zaibin, Jiang Wei, Jiang Shiquan, et al. Control scheme for displacement vector of three-pad biasing rotary steerable system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 676-683.
- [14] 杨全进, 韩来聚, 葛鹏, 等. 旋转导向马达(RSM)控制精度浅析[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(4): 21-23.
Yang Quanjin, Han Laiju, Ge Peng, et al. A discussion on controlling accuracy of rotary steering motor[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(4): 21-23.
- [15] 李俊, 倪学莉, 张晓东. 动态指向式旋转导向钻井工具设计探讨[J]. 石油矿场机械, 2009, 38(2): 63-66.
Li Jun, Ni Xueli, Zhang Xiaodong. Approaching of dynamic point-the-bit rotary steering drilling tool[J]. Oil Field Equipment, 2009, 38(2): 63-66.

辽河油田应用新型防膨剂提高注水开发效果

注水开发中, 由于地层中黏土含量过高, 当注入水与黏土矿物质相遇时, 极易发生水化膨胀, 堵塞地层孔隙, 降低渗透率, 影响开发效果。为此, 辽河油田研制出了一种新型黏土防膨剂, 该防膨剂具有减少黏土表面负电性的特性。这种负电性通过电荷之间的离子交换, 可使膨胀性黏土转化为非膨胀性黏土, 从而抑制黏土矿物遇水膨胀, 确保注水井的注入压力稳定在正常水平。

辽河曙光油田曙三区杜家台油层的大部分油井, 储层胶结疏松, 极易发生水化膨胀。2011年以来, 新型黏土防膨剂在该油区注水井累计应用 10 井次, 成功率 100%, 有效率 100%。

大庆油田开发出斜井自定向射孔技术

当斜井进行定方位射孔时, 采用油管输送式射孔时管柱旋转困难, 无法实现定方位射孔, 需要采用模块化电缆定方位射孔技术。但该技术施工工艺相对复杂, 施工周期较长, 成本较高。为此, 大庆油田进行了斜井自定向射孔技术研究并获得成功, 从而免除了用陀螺仪测量方位和旋转管柱作业, 可降低成本, 提高劳动效率。