

# 高速泥浆脉冲传输技术在随钻测井系统的应用研究

张 冲, 张 爽, 王智明

(中海油田服务股份有限公司, 河北 三河 065201)

**摘要:**中海油服自主研发的 Drilog<sup>®</sup>随钻测井系统由 MWD 系统、DSM 参数仪, 以及 ACPR 电阻率伽马组成, 该系统已成功作业上百井次。为提高机械钻速 ROP, 挂接更多高端成像仪器, 中海油服自主研发了 HSVP<sup>®</sup>高速泥浆脉冲遥传系统, 包括井下仪器及地面解码系统, 经过水循环测试及实钻测试, 可实现 12 bps 实时解码。在油气田勘探开发中, 高速泥浆脉冲器可提高井地传输效率, 有助于及时调整井眼轨迹, 对提高油气田单井产量, 提高采收率发挥重要作用。文章介绍了高速泥浆脉冲器在山西页岩气田某井 8½ in 井段的使用过程, 根据 MWD 系统上传数据, 分析轨迹控制、动态轨迹测量、随钻测井质量等效果。结果显示 HSVP<sup>®</sup>系统的钻进效率高, 上传速率快, 定向及时准确, 证明了系统在钻进过程中测井质量优良, 为系统的扩大使用积累了作业经验。

**关键词:**随钻测井系统; 高速泥浆脉冲; 泥浆脉冲发生器; 页岩气

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)10-0007-06

## Application of high-speed mud pulse transmission technology in LWD

ZHANG Chong, ZHANG Shuang, WANG Zhiming

(China Oilfield Services Limited Oilfield Technology Institute, Sanhe Hebei 065201, China)

**Abstract:** The Drilog<sup>®</sup> LWD developed by COSL consists of MWD, DSM and ACPR, and have already been put into operation for hundreds of times. In order to improve ROP and incorporation of more high-end imaging instruments, COSL has independently developed the HSVP<sup>®</sup> high-speed mud pulse telemetry system which includes the downhole instrument and the surface decoding system. Water circulation testing and field trial demonstrate that it can realize real-time decoding at 12bps. In the exploration and development of oil and gas fields, the HSVP<sup>®</sup> can improve the transmission efficiency from downhole to surface; thus, helping to control the drilling trajectory real time, and contributing to the single well productivity and recovery. This paper introduces the use of the high-speed mud pulse tool over the 8½in section of a Shanxi shale gas well. According to the data from the MWD system, analysis is made of the results from trajectory control, dynamic trajectory measurement and logging while drilling quality. The results show that the HSVP<sup>®</sup> system has high drilling efficiency, fast transmission rate and timely and accurate orientation. It has been proven that the logging quality of the system is excellent during the drilling process. The field use of the tool has also accumulated experience for the further use of the system.

**Key words:** LWD; high speed mud pulse; mud pulser; shale gas

## 0 引言

无线随钻测井系统是在定向钻井无线随钻测量仪的基础上发展起来的一种装备, 可随钻进过程实时上传井眼轨迹、地层参数以及井下工程参数<sup>[1-3]</sup>。因其随钻进过程测量并实时上传数据, 具有高时效

性, 可为导向控制、评价地层及产层特性、油气田开发方案和措施提供可靠的依据, 同时可提高井眼轨迹控制、减小井眼轨迹脱靶风险、提高钻井机械速度、减少下钻次数、缩短钻井周期、提高钻井效率。随时了解井下信息, 减少因盲打造成的经济损失。

**收稿日期:**2020-05-18; **修回日期:**2020-09-09 **DOI:**10.12143/j.tkge.2020.10.002

**基金项目:**中国海洋石油集团有限公司科研项目“Drilog 随钻测井高速遥传系统研制与工程化”(编号: YJB19YF010)

**作者简介:**张冲, 男, 汉族, 1982 年生, 高级工程师, 石油工程专业, 从事现场定向随钻工作, 山西省吕梁市临县中海油田测井基地, zhangchong11@cosl.com.cn。

**通信作者:**张爽, 女, 汉族, 1989 年生, 工程师, 信号与信息处理专业, 硕士, 从事随钻测井仪器研发工作, 河北省三河市燕郊海油大街 201 号中海油田技术研究院, zhangsh6@cosl.com.cn。

**引用格式:**张冲, 张爽, 王智明. 高速泥浆脉冲传输技术在随钻测井系统的应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(10): 7-12.

ZHANG Chong, ZHANG Shuang, WANG Zhiming. Application of high-speed mud pulse transmission technology in LWD[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10): 7-12.

同时当井斜度过大,如超过 65°,或井壁状况不好易发生坍塌或堵塞时,难以在钻井完工后进行电缆测井,随钻测井即可在这种情况下避免测井资料难以取得的问题。

目前,随钻测量的无线信息传输方法主要有 3 种:钻井液压力波法、声波法和电磁波法,每种方式都有其局限性和适用范围,其中声波法和电磁波法传输速率快,但需要安装中继器或换能器等,在现有技术能力下,其应用范围局限性很大。而钻井液压力波法应用则最为广泛、可靠。钻井液压力波法常用的方法包括正脉冲、负脉冲,连续波 3 种。其中,负脉冲系统由于会对井壁产生一定的破坏,并且造成钻井液的能量损失,目前已基本被淘汰;正脉冲系统目前采用的技术是用阀的轴向运动产生,数据传输速率较低,能做到 3~4 bps,已经很难满足石油钻井过程中对测量实时性的要求。连续波脉冲器采用旋转或摆动的方式产生压力波,其波形具有连续性,可载信息量大,能够实现更高速率的随钻数据传输。但同时具有驱动控制精度要求高,调制解调方案设计难度大,压力波形易受噪声影响等难点。因此目前世界上掌握连续波泥浆脉冲随钻数据传输技术的公司屈指可数。

中海油服自主研发的 Drilog<sup>®</sup>系统已完成现场作业上百次。随着作业经验积累,仪器设计日益完善,其作业线可挂接仪器日益增多,由基本的 MWD 拓展到 ACPR 电阻率伽马,再到先进的中子、密度等测井仪器,甚至高端成像仪器,挂接的测井仪器越多,需要实时上传至地面的数据量也越大,对数据传输能力要求越高。原有脉冲式脉冲发生器渐渐无法满足数据传输量的需求,因此中海油服自主研发了 HSVP<sup>®</sup>高速泥浆脉冲遥传系统,该系统最高可实现 12 bps 实时上传速率,可充分满足日益增长的随钻数据传输量需求。

### 1 系统组成

#### 1.1 Drilog<sup>®</sup>随钻测井系统

Drilog<sup>®</sup>随钻测井系统(简称“Drilog<sup>®</sup>”)由井下仪器和地面系统组成<sup>[4-5]</sup>,如图 1 所示。Drilog<sup>®</sup>系统采用正脉冲式脉冲器进行随钻泥浆脉冲发生,通过钻井液传输,井下仪器可以以最高 3 bps 数据传输速率将井下实时测量数据传输至地面系统,地面系统可通过指令下传装置将特定指令发送给井下仪器,实现对井下仪器的实时控制。

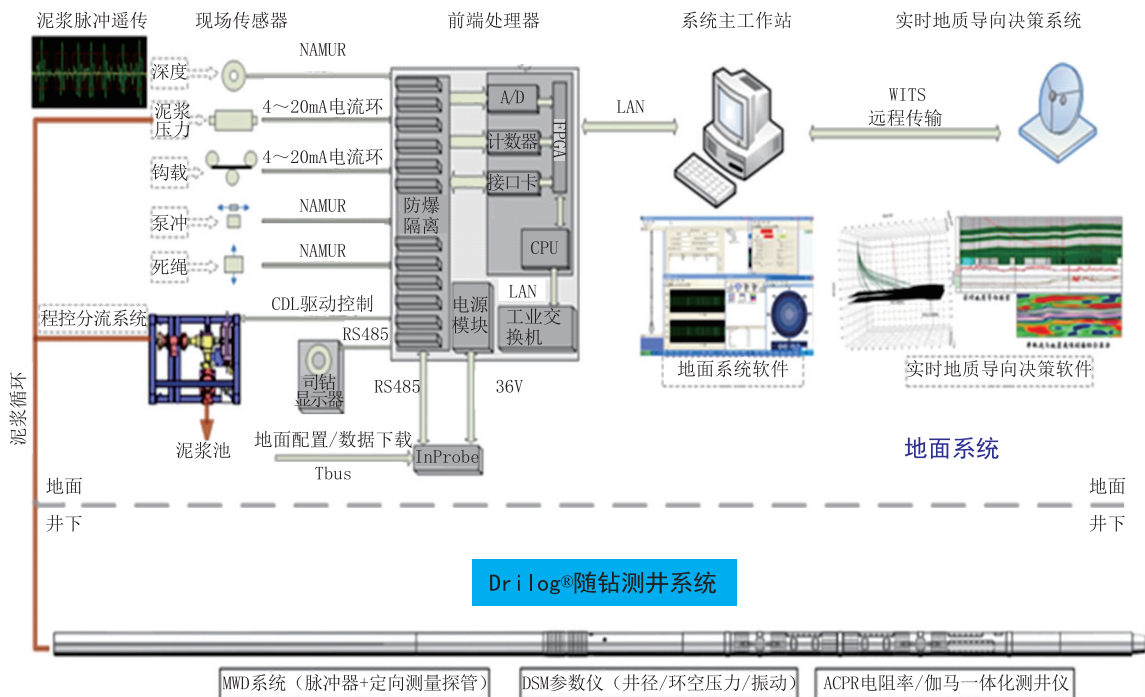


图 1 Drilog<sup>®</sup>系统总体架构

Fig.1 Overall architecture of the Drilog<sup>®</sup> system

Drilog<sup>®</sup> 井下仪器主要由随钻测量仪 DIM (MWD 系统)、工程参数测量仪 DSM 及随钻电阻率伽马一体化测井仪 ACPR 组成。DIM 采用泥浆正脉冲发生器作为井下信息上传装置,以三轴加速度计及三轴正交的磁通门实现井眼的井斜、方位及工具面角测量。DSM 负责总线通信控制及系统授时和供电,并具备超声井径测量,环空压力测量及振动冲击测量的功能<sup>[6-7]</sup>。ACPR 集成电磁波电阻率和自然伽马测量,具备多探测深度,高纵向分辨率等特性。

地面系统由前端处理单元(EPU)和地面管理主系统(IDEAS)组成,二者通过网络实现通信。EPU 实现信号采集处理、实时计算和通道扩展功能<sup>[8]</sup>,符合作业现场防爆隔离的安全规范。IDEAS 系统集成数据管理、仪器通信、实时解码计算、出图显示等功能模块。系统通过井场信息传输标准(WITS)<sup>[9]</sup>,可将井场作业数据实时传输到基地的实时专家决策系统(RTC),实现远程实时地质导向。

## 1.2 HSVP<sup>®</sup>高速泥浆脉冲传输技术

HSVP<sup>®</sup>系统作为脉冲器负责泥浆脉冲信号的驱动产生<sup>[10-11]</sup>,将其挂接在 Drilog<sup>®</sup>系统中,替代原 Drilog<sup>®</sup>系统中的正脉冲式脉冲发生器,通过 Tbus 总线与 Drilog<sup>®</sup>系统的中控设备连接,在 Tbus 总线中,测井仪器将测得的数据上传至总线,中控采集总线上的数据,发送给 HSVP<sup>®</sup>的通信电路板,通信板提取这些数据,编码后提供给驱动控制电路,再由驱动控制电路控制电机运动,带动转子剪切泥浆流体,实现压力波形的产生。

HSVP<sup>®</sup>系统的核心部件为泥浆脉冲发生机构,该机构采用阀片转动剪切流体实现对泥浆的截流效应从而形成压力波动的基本原理。该结构不同于脉冲式脉冲发生器产生的脉动信号,而是可以产生连续变化的连续波式压力波形,这种波形具有更优良的抗噪性,可满足更复杂的调制方式设计要求。进而实现更高速率的数据传输。

高速泥浆脉冲随钻数据传输系统分为井下部分,井上部分。如图 2 所示,其中井下通信电路板采集总线上的工程参数及地层参数,通过数据编码器将模拟信号转换为数字信号,数字信号经控制电路调制,传递给驱动电路,驱动电路控制电机运动,带动泥浆脉冲器转子摆动,对流经的泥浆介质形成截

流效应,产生脉冲信号,信号经钻柱内泥浆信道传输到地面,在地面管线处的压力传感器采集压力波幅值,通过线缆传输到地面解调系统,进而将压力波形解析成数字信号,完成井下测井数据到井上的传播过程。

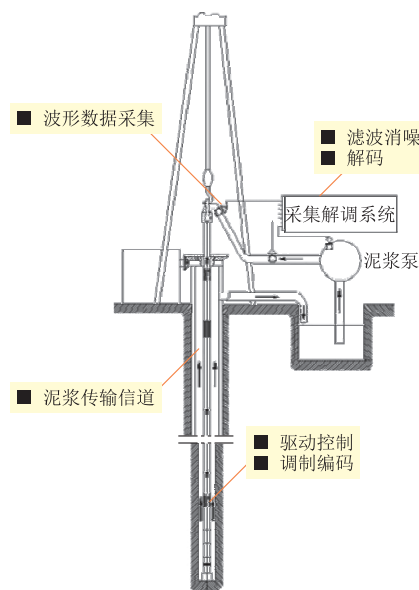


图 2 HSVP 系统组成示意

Fig.2 HSVP system composition

## 2 HSVP<sup>®</sup>系统在中原某井 8 1/2 in 井段的应用

### 2.1 作业概述

该井位于中原地区,属于页岩气开发井,设计井深 2335 m,实际完钻深度 2317 m。一开钻进至 218 m,套管下至 217 m。二开为本次作业井段,由 HSVP 搭配 Drilog 系统完成钻进,进尺 2110 m,总循环时间 223.25 h。钻探目的为落实评价该井区 2 个目标层段含气性及产能。本次作业泥浆流量约 1700 L/min,泵压 9~13 MPa,钻压 21~156 kN,转速约 57 r/min。根据井段设计,设置 2 个靶点,全部中靶。

本次作业采用 HSVP<sup>®</sup>与 Drilog<sup>®</sup>系统串联仪器串,入井仪器从上至下依次包含:保护短接,高速脉冲器,涡轮发电机,探管,中控,电阻率伽马,转换短节,钻头。其中探管为随钻测量仪器,负责测量井斜方位。电阻率伽马为测井仪器,测量地层电阻率及伽马参数。中控为井下仪器的中枢,负责给各仪器授时及编辑数据帧,内部数据传输控制等。涡轮发电机为井下供电仪器,依靠泥浆冲刷带动涡轮转动

实现发电,为井下各支仪器提供电力保障。高速脉冲器为脉冲发生器,利用截流效应,通过转子转动实现对钻具内泥浆的憋压,从而产生压力波动,将井下

信息由电信号转换为可通过泥浆信道传输的压力波信号<sup>[12-15]</sup>。入井仪器连接如图3所示。

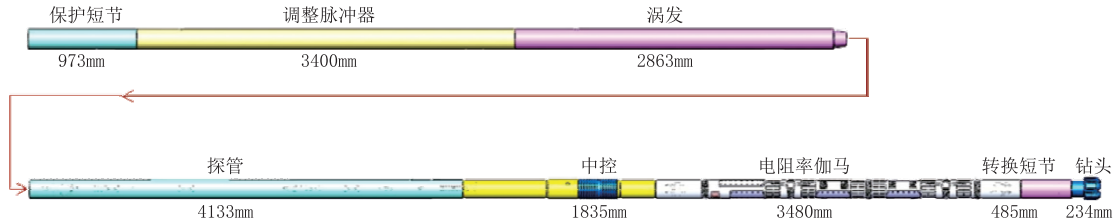


图3 HSVP<sup>®</sup>泥浆脉冲器及井下仪器连接示意

Fig.3 Connection of the HSVP<sup>®</sup> mud pulser and the downhole instrument

### 2.2 轨迹控制

该井二开井段进行2次造斜。第一次造斜在270~503.61 m进行,造斜角度达到25.86°,第二次造斜在1560~1627.71 m进行,造斜角度达到34.22°,以该井斜钻至井底。通过井下仪器测量动态轨迹,实时上传至地面,通过实时解调系统的解调结果计算井下仪器的实时轨迹,指导轨迹控制,成功命中分别位于垂深1498.5 m和1711.0 m的2个预设靶点。

定向井轨迹设计投影如图4、图5所示。

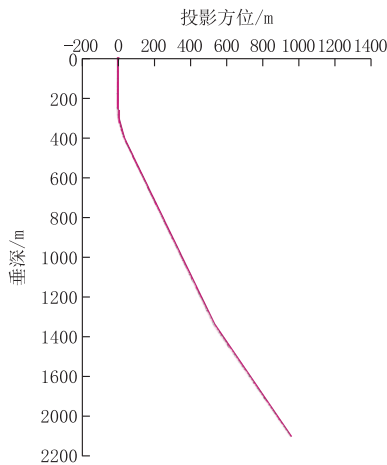


图4 垂直投影

Fig.4 Vertical projection

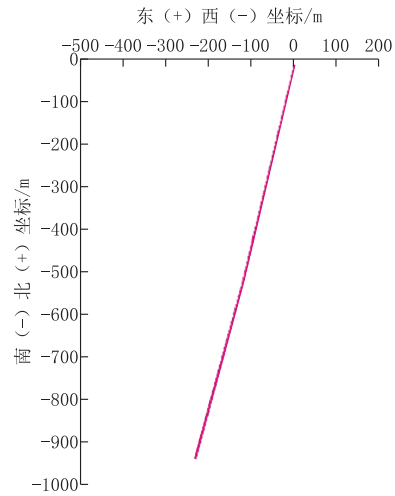


图5 水平投影

Fig.5 Horizontal projection

表1 仪器有效传输速率

Table 1 Effective transmission rate

标称传输速率/bps	有效传输速率/bps
12	8.50
6	4.65
3	2.44

表2 传输速率与机械钻速关系

Table 2 Relationship between transmission rate and ROP

标称传输速率/bps	最大 ROP/(m·h <sup>-1</sup> )
3	48.8
6	93.0
12	170.0

### 2.3 数据传输速率

在本次作业过程中,根据信道频率选择特性选择信号质量优良的频率作为载波频率,基于此选择3、6、8 bps等速率传输数据,因数据帧包含同步信息,校验信息等,存在的一定比例的冗余信息,仪器的有效传输速率与标称传输速率关系如表1所示。

在本次钻井过程中,传输伽马、电阻率及井斜、

方位、工具面、涡轮转速等参数,则绘制一个数据点需要传输数据量为32 bit,加上同步头、帧号等信息,传输一个数据点需要传输的数据量为60 bit。按照每钻进1 m传输3个点的的数据量计算,该仪器可在以下机械钻速(ROP)范围内达到每米传输3个数据点的作业需求。该ROP已能够充分满足本



次作业钻进速率要求。

### 2.4 数据传输质量

该井测井曲线截取如图 6 所示,图中包含 3 条曲线:伽马曲线及 2 条电阻率曲线,每条曲线均绘制了仪器内存读取曲线 Read 曲线及实时解调测井曲

线 RT 曲线。由图中 6 可以看出,实时解调曲线与内存读取曲线可以较好拟合,数据正确率较高;平均每米包含约 3 个以上测点,测点密度达到现场应用需求。

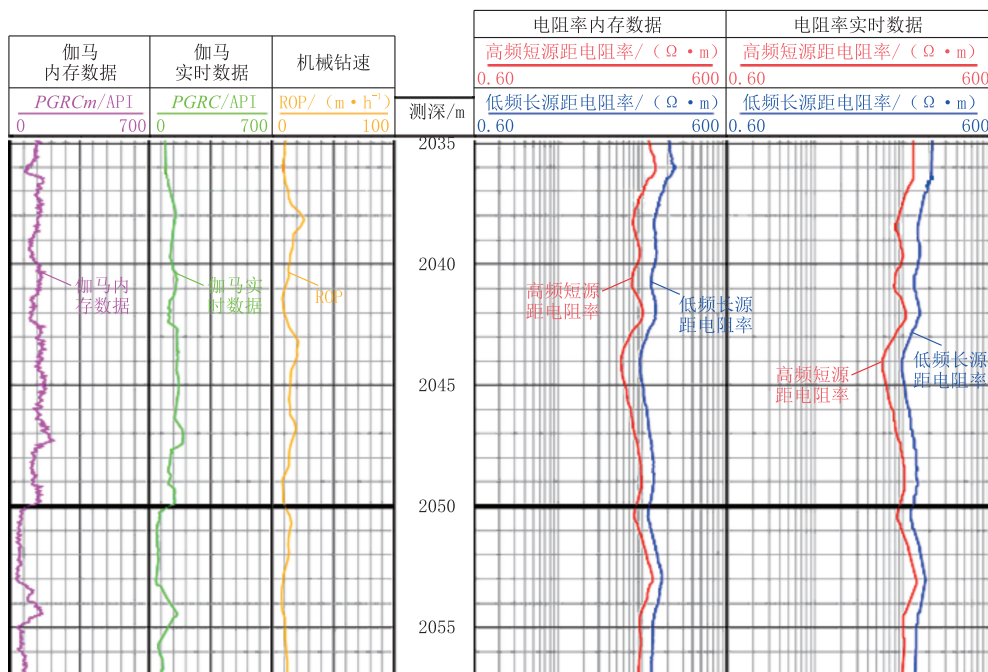


图 6 测井曲线  
Fig.6 Logging curve

### 2.5 应用问题

在作业过程中,某些井段存在泵压不稳的情况,包括:司钻送钻不稳造成泵压不稳;泵作动频率不稳造成泵压波动;马达憋压造成的泵压波动。这类波动会影响实时解调效果,可采取如下方法解决:请司钻平稳送钻;调整解调算法对波动的泵压进行处理。

### 3 结论

该中原某井作业的成功验证了 HSVP®系统的可靠性和可用性:

(1) HSVP®高速泥浆脉冲传输系统能够与 COSL 自研 Drilog®系统正常挂接,良好配合,高效高质量完成随钻测井工作。

(2) 高速率脉冲器系统工作时长及设备质量满足钻井环境需求,超 200 h 连续作业能力充分满足现场作业需求。

(3) 高速泥浆脉冲传输技术能够满足导向需求,能够及时跟踪钻井轨迹,指导导向钻进,提高钻井效

率。

(4) HSVP®系统能够满足实际钻井过程中对传输速率及传输质量的需求,满足现场作业要求,提高随钻数据上传质量。

### 参考文献 (References):

[1] 张涛, 鄢泰宁, 卢春华. 无线随钻测量系统的工作原理与应用现状[J]. 西部探矿工程, 2005(2): 126-128.  
ZHANG Tao, YAN Taining, LU Chunhua. Working principle and application of wireless MWD[J]. West-China Exploration Engineering, 2005(2): 126-128.

[2] 刘新平, 房军, 金有海. 随钻测井数据传输技术应用现状及展望[J]. 测井技术, 2008(3): 249-253.  
LIU Xinping, FANG Jun, JIN Youhai. Application status and prospect of LWD data transmission technology[J]. Well Logging Technology, 2008(3): 249-253.

[3] 苏义脑, 窦修荣. 随钻测量、随钻测井与录井工具[J]. 石油钻采工艺, 2005(1): 74-78, 85.  
SU Yiniao, DOU Xiurong. Measurement while drilling, logging while drilling and logging instrument[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005(1): 74-78, 85.

[4] 孙霄, 董景新, 顾启泰. 近钻头测斜器最优八位置标定法[J]. 中

- 国惯性技术学报, 2014, 22(1): 5-8.  
SUN Xiao, DONG Jingxin, GU Qitai. Optimal 8-position calibration for at-bit inclinometer[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(1): 5-8.
- [5] 王智明, 尚捷, 菅志军, 等. SPOTE 随钻测井系统的试验研究[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2012, 14(3): 25-30.  
WANG Zhiming, SHANG Jie, JIAN Zhijun, et al. Trial study of SPOTE LWD system[J]. Journal of Chengde Petroleum College, 2012, 14(3): 25-30.
- [6] 岳喜洲, 马明学, 李国玉. 随钻电磁波测井仪天线结构设计数值模拟[J]. 石油仪器, 2015, 1(1): 16-19.  
YUE Xizhou, MA Mingxue, LI Guoyu. Simulation of the design of antenna structure of electromagnetic wave propagation log while drilling tool[J]. Petroleum Instruments, 2015, 1(1): 16-19.
- [7] 李国玉, 马明学, 彭智. 阵列感应测井仪温度校正方法研究[J]. 石油仪器, 2012, 26(4): 87-89.  
LI Guoyu, MA Mingxue, PENG Zhi. Research on the temperature correction method of the array induction logging tool[J]. Petroleum Instruments, 2012, 26(4): 87-89.
- [8] 蒋荻南, 张松伟, 卢华涛. 基于 CompactRIO 的随钻嵌入式处理单元[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 287-290  
JIANG Dinan, ZHANG Songwei, LU Huatao. LWD embedded process unit based on CompactRIO[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8): 287-290
- [9] 邓晓清, 卢华涛, 尹博. 一种基于 WITSML 的随钻作业数据远程传输系统[J]. 科技视界, 2016, 1(27): 46-47.  
DENG Xiaoqing, LU Huatao, YIN Bo. A type of WITSML based teletransmission system of LWD operating data[J]. Science & Technology View, 2016, 1(27): 46-47.
- [10] 王智明, 张崢, 张爽. 高速率泥浆脉冲器工作模式设计与试验[J]. 石油矿场机械, 2019, 48(1): 51-55.  
WANG Zhiming, ZHANG Zheng, ZHANG Shuang. Experimentation and design on work pattern of the high rate pulser[J]. Oil Field Equipment, 2019, 48(1): 51-55.
- [11] 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.
- [12] 邓晓清, 王智明, 彭劲勇. Drilog 与 Welleader 系统的应用研究[J]. 煤矿机械, 2017, 38(6): 139-142.  
DENG Xiaoqing, WANG Zhiming, PENG Jinyong. Application research of drilog LWD system and welleader RSS[J]. Coal Mine Machinery, 2017, 38(6): 139-142.
- [13] 岳明亮. Drilog 随钻测井系统在渤海油田的应用[J]. 海洋石油, 2017, 37(2): 51-55.  
YUE Mingliang. Application of drilog LWD system in Bohai Oilfield[J]. Offshore Oil, 2017, 37(2): 51-55.
- [14] 菅志军, 尚捷, 彭劲勇, 等. Welleader<sup>®</sup>及 Drilog<sup>®</sup>系统在渤海油田的应用[J]. 石油矿场机械, 2017, 46(6): 57-62.  
JIAN Zhijun, SHANG Jie, PENG Jinyong, et al. Application of Welleader<sup>®</sup> and Drilog<sup>®</sup> system in Bohai Oilfield[J]. Oil Field Equipment, 2017, 46(6): 57-62.
- [15] 刘岩松, 衡万富, 刘斌, 等. 水平井地质导向方法[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(S1): 4-6.  
LIU Yansong, HENG Wanfu, LIU Bin, et al. Discussion on geosteering methods of horizontal wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(S1): 4-6.

(编辑 韩丽丽)

## (上接第 6 页)

- [10] 刘明军. RMRS 偏心连通技术在煤层气水平远端对接井中的应用研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(6): 111-115.  
LIU Mingjun. Application of RMRS eccentric communication in CBM horizontally-remote intersected well[J]. Coal Engineering, 2020, 52(6): 111-115.
- [11] 商敬秋, 武程亮, 刘汪威, 等. 无建槽直井的定向中靶作业[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(1): 13-16.  
SHANG Jingqiu, WU Chengliang, LIU Wangwei, et al. Oriented target-hitting operations for vertical well without cavity building[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(1): 13-16.
- [12] 隆东, 张新刚, 岳刚, 等. H024 井施工工法及精确中靶技术措施[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(3): 5-8, 12.  
LONG Dong, ZHANG Xingang, YUE Gang, et al. Construction technology of well H024U and the technical measures of accurate target hitting[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(3): 5-8, 12.
- [13] 胡汉月. 对接井靶区建槽若干问题探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(7): 20-23.  
HU Hanyue. Discussion of cavity development in the target area of intersection well pair[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(7): 20-23.
- [14] 王壇文. IGRF 在地磁研究中的应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 558-561.  
WANG Tanwen. The application of international geomagnetic reference field to the basic researches[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(2): 558-561.
- [15] 杨梦雨, 管雪元, 李文胜. IGRF 国际地磁参考场模型的计算[J]. 电子测量技术, 2017, 40(6): 97-100, 104.  
YANG Mengyu, GUAN Xueyuan, LI Wensheng. Calculation of IGRF international geomagnetic reference field model[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(6): 9-100, 104.

(编辑 韩丽丽)