

井下声波信号沿油管传输特性试验

雷鹏¹, 邵振鹏¹, 李俊杰¹, 程莹¹, 魏瑾², 刘学忠¹

1. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司 河北廊坊 065007

2. 中国石油华北油田河北储气库分公司 河北廊坊 065007

通讯作者: Email: 1040433645@qq.com

项目支持: 中国石油集团渤海钻探工程工程有限公司揭榜挂帅科研项目“自动化实时化测试技术研究”(2023ZD01F-02), 中国石油集团油田技术服务有限公司科学研究与技术开发项目“万米深层超深层钻完井及测试配套工具研制与应用”(2024T-001-002)

引用: 雷鹏, 邵振鹏, 李俊杰, 等. 井下声波信号沿油管传输特性试验[J]. 油气井测试, 2024, 33(3): 19-24.

Cite: LEI Peng, SHAO Zhenpeng, LI Junjie, et al. Experimental study on transmission characteristics of downhole acoustic signals along tubing[J]. Well Testing, 2024, 33(3): 19-24.

摘要 针对试油测试中声波遥传技术的信号传输问题, 研制了声波中继器试验样机, 开展了声波沿管柱的传输特性试验研究。通过3口井的现场试验, 探索了声波沿管柱的传输规律, 结果表明, 声波信号沿管柱的传输特性受井眼尺寸、油管长度以及套管内介质影响较大, 声波信号强度随油管长度的增加呈指数衰减规律, 本次试验条件下, 最大传输距离为805 m; 井内介质对声波信号的较优载波频率影响较大, 当井内为空气时较优载波频段为10~10.5 kHz, 当井内充满水时较优载波频段为13~13.5 kHz。研究成果为声波遥传技术相关工具的开发提供数据支持, 也为打破技术垄断, 实现实时高效测试技术奠定基础。

关键词 声波传输; 地层测试; 中继器; 传输距离; 载波频率; 试验研究; 无线遥传

中图分类号: TE353

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.03.004

Experimental study on transmission characteristics of downhole acoustic signals along tubing

LEI Peng¹, SHAO Zhenpeng¹, LI Junjie¹, CHENG Ying¹, WEI Jin², LIU Xuezhong¹

1. Well Testing Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Langfang, Hebei 065007, China

2. Hebei Gas Storage Branch of PetroChina Huabei Oilfield Company, Langfang, Hebei 065007, China

Abstract: For signal transmission in acoustic telemetry during well testing, a prototype acoustic repeater was developed, and an experimental study was conducted on the transmission characteristics of acoustic signals along tubing strings. Field experiments in three wells were carried out to explore the transmission patterns of acoustic signals along the tubing. The results show that the transmission characteristics of acoustic signals are significantly influenced by the wellbore dimensions, tubing length, and the medium inside the casing. The signal strength of acoustic waves decays exponentially with increasing tubing length, with a maximum transmission distance of 805 meters under the experimental conditions. The optimal carrier frequency of the acoustic signal is notably affected by the medium within the wellbore. When the wellbore is filled with air, the optimal carrier frequency range is 10~10.5 kHz; when filled with water, the optimal range shifts to 13~13.5 kHz. These findings provide valuable data for the development of tools related to acoustic telemetry technology, which lays a foundation for breaking technological monopolies and achieving real-time efficient testing.

Keywords: acoustic transmission; formation testing; repeater; transmission distance; carrier frequency; experimental study; wireless telemetry

测试中, 获取井下信息的途径主要有两种方式: 一是采用井下存储的方式录取井下资料, 起出管柱后读取相关资料; 二是采用井下短距离跨阀无线传输, 阀上采取电缆对接的方式完成资料录取^[1-3]。这两种读取井下信息方式均存在一定的局限性, 例如采用存储方式不能及时获取井下资料, 测试解释成果存在滞后性; 采用短距离跨阀无线传

输在施工中需要电缆车配合, 仪器下入也受到井况的限制, 适应性相对较差, 因此需要研发一种全井筒无线传输的方式获取井下信息。

目前, 全井无线传输技术主要有泥浆脉冲遥传、电磁波传输、声波遥传^[4-5]。其中, 泥浆脉冲方式虽使用广泛, 技术比较成熟, 但传输速度较低, 且其传输过程需井筒循环流动, 不适合测试施工工

况;电磁波传输方式采用电磁波穿越地层传输信息,受地层电阻率的影响大,在实际应用中为了确保传输距离与信号稳定性,频率选用超低频波段,导致信息传输速率低,不能满足测试资料实时录取的需要;声波遥传技术采用声波在油管中的传输作为传输介质,具有传输速率快的特点,但其信号传输过程中信号衰减较快,导致传输距离有限;为了解决声波传输距离有限的问题,一般需采取中继器(信号接力)的方式实现全井传输^[6]。中继器作为声波遥传技术的关键仪器,需要获取单个中继器较优传输距离,减少中继器的使用量,降低系统的复杂性,提高系统的稳定性^[7]。王婷婷等^[8]对井下过套管超声波无线能量传输系统进行了研究,建立了发射和接收两个模块,开展了不同厚度套管的能量传输实验。姜楠^[9]通过采用超低频电磁波为传输载体及特殊通信机制,有效提高了井下数据无线传输性能。吴琰等^[10]建立了油套管模型,运用 ANSYS 进行仿真分析,将仿真数据和现场实验结果进行对比认为传输信号受影响的关键机理与电磁波发射器部分阻抗的分布有关。研究结果表明,中继器传输距离受井筒尺寸、井内介质、载波频率的影响较大^[11-13],因此本文通过对声波无线中继器系统试验研究,获取特定工况下声波中继器在井筒中沿油管的传输特性,为后续无线传输系统样机的开发提供指导。

1 试验方案

声波中继器无线传输试验装置由井下声波发射装置与井口接收装置两部分组成。井下声波发射装置见图 1,由悬挂接头、油管、防掉接头、声波中继器及扶正器等部分组成。

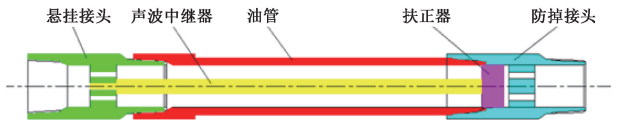


图 1 井下声波发射装置
Fig.1 Downhole acoustic transmitter

入井前,首先将声波中继器与悬挂接头通过螺纹紧密连接在一起,在声波中继器另一端安装尼龙扶正器后,将该部分与油管紧密连接在一起,连接防掉接头完成声波发生装置的组装。悬挂接头的主要作用是悬挂声波中继器,连接上部油管,促使声波中继器所产生的声振动能够沿管柱较好的传播。扶正器的主要作用是保护声波中继器在下入

过程中油管的振动造成仪器损坏。防掉接头的作用是连接下部油管,防止因声波中继器脱落造成仪器落井事件发生。试验时,仅需与油管上、下相连,即可入井。

井口接收装置由油管抱卡、内六角螺母、换能器以及缆线等部分组成。为了安装方便,油管抱卡为两瓣式,可通过内六角螺母固定于油管上。试验前,首先将换能器用胶粘在油管抱卡上,后用两瓣油管抱卡抱住短油管,采用内六角螺母将油管抱卡固定于短油管,保持油管抱卡与短油管紧密贴合。使用时,直接将该段短油管与井口管柱相连即可进行数据接收。该实验主要技术参数见表 1。

表 1 无线传输装置主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of wireless transmission device

名称	外径 /mm	长度 /m	内孔 /mm	上端端扣型	下端扣型
井口接收装置	73	1.00	62	73 mm EUE	73 mm EUE
井下发射器	73	2.45	4 * 10	73 mm EUE	73 mm EUE
外壳声波中继器	32	2.26	/	/	/

2 试验情况

为了充分了解声波信号沿油管的传输特性,分别从载波频率、信号衰减规律、井筒尺寸及井内介质等方面对试验方案进行了设计,完成了晚 22-1 井、文 23k-1X 井及泉 42-113X 井 3 井次的入井试验,通过试验掌握了声波信号沿管柱的传输规律。

2.1 务 22-1 井

该井为了探明声波信号传输的中控因素,为后续针对性的试验指明方向。采用声波发射频率为 37 kHz,仪器接电后,由声波中继器自动按照 37 kHz 载波频率每隔 2 min 发射一组数据,如此往复发送数据,直至试验结束。

试验的井筒条件为 139.7 mm 套管,73 mm 油管,井筒 1 000 m 以上区域为空气。试验时,采用 2 根油管+无线传输短节+油管的管柱结构,井下声波发射装置分别位于井下 54.9 m(6 根油管),100.6 m(11 根油管),158.2 m(17 根油管),257.5 m(28 根油管),313.3 m(34 根油管),364.2 m(39 根油管)时,将示波器接入地面接收装置录取信号,图 2 为示波器录取的典型信号波形。

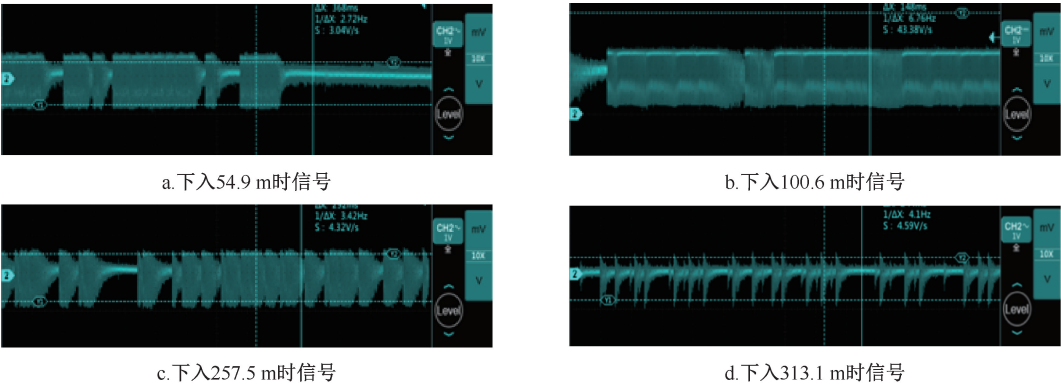


图 2 典型信号波形
Fig. 2 Typical signal waveform

由图可知,随着声波发射装置下入深度的增加,示波器所录取的声波信号强度明显下降,下入深度至 313.1 m 时,信号强度衰减很大,信号已呈现不完整形态。同时,在本次试验中还发现两方面的问题:一是所采用的载波频率所接收到的信号存在拖尾现象,需要加入信号处理算法进行信号还原;二是所选用频率较高,而在井口所接收到的实际信号的频率却较低,出现了频移与频散现象,表明 37 kHz 的传输频段不适合该种井下工况。调研结果表明,低频声波信号对井下管柱具有较好的适应性,因此需要降低声波发射频率。

2.2 声波中继器优化设计

基于首次现场试验的结果,将声波传输的载波频率设定在 8~13 kHz 之间,同时增加了 FFT 信号

处理算法,用以提高信号的识别准确性,解决信号存在的拖尾现象。

(1) 声波在油管中的信道传输模拟

油管信道由不同长度的油管 and 接箍周期性级联构成,油管级联数决定了油管信道的总体长度。随着下入深度的增加,油管数量不断增加,构成了贯穿井眼的油管信道,此时油管信道的声波传输性能将受到管柱长度的影响而发生变化。本次仿真采用 73 mm 油管,假定单根油管长度均为 9.5 m,接箍长度为 130 mm,油管密度 7 850 kg/m³,在油管中的传播速度为 5 130 m/s,分别对 10 根与 50 根油管长度的油管进行仿真(见图 3),对应接箍数分别为 9、49,仿真的频率范围为 8~14 kHz,频率间隔为 1 Hz。

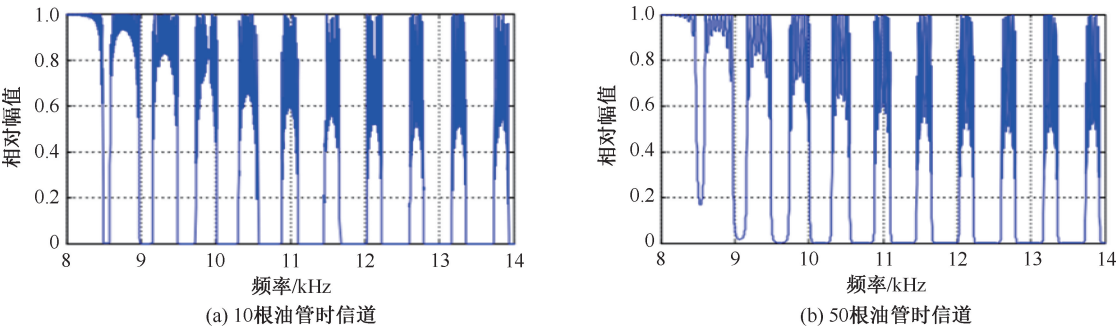


图 3 油管信道仿真分析
Fig. 3 Tubing channel simulation analysis

图 3 显示,周期性油管信道呈现出通阻带交替出现的梳状滤波特性,在通带内呈现出上下起伏的非平坦尖峰。随着频率变高,通带变窄、阻带变宽,同时通带内的尖峰数量增加,且尖峰数由级联的接箍数决定。此外,随着油管级联数的增加,通阻带的起始频率和截止频率有一定变化,但变化不明显。

(2) 信号处理方法研究

为了较好的获取声波信号,在接收到信号以后,对信号首先进行基于发射频段的 FFT 频域分析,将模拟信号转换成数字信号;此后再次对信号进行数字滤波处理,提取与发射信号特征相匹配的信息同时,对不相匹配的噪声进行衰减处理,以达到提高声波信号辨识度,降低误码率的目的,声波信号处理前后对比见图 4。

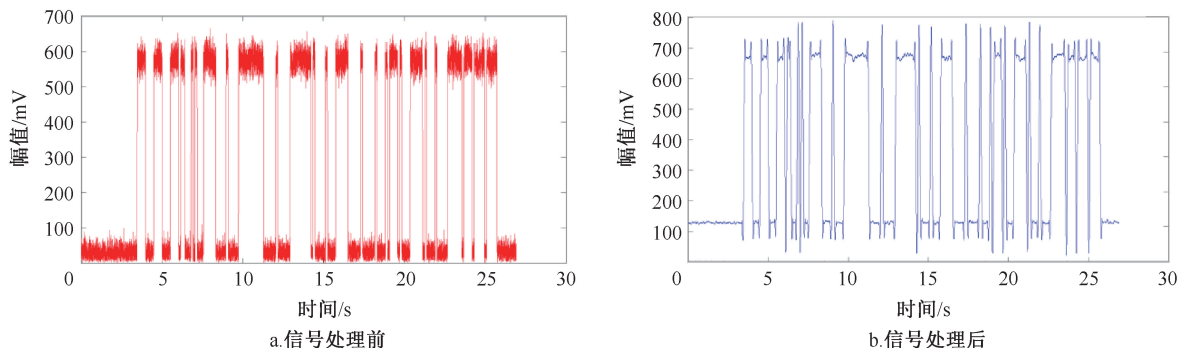


图4 声波信号处理前后对比

Fig. 4 Comparison before and after acoustic signal processing

2.3 文 23k-1X 井

试验采用声波发射频率为 8~13 kHz, 每隔 0.5 kHz 设置一个载波频率, 共设置 11 个载波频率。仪器接电后, 由声波中继器自动按照频率从低到高的顺序每隔 2 min 发射一组数据, 当声波发射频率达到 13 kHz 后, 声波中继器自动回到 8 kHz 的声波发生频率发射数据, 如此往复发送数据, 直至试验结束。

试验的井筒条件为 177.8 mm 套管, 73 mm 油管, 井筒 200 m 以上区域为空气。试验时, 采用 4 根油管+无线传输短节+油管的管柱结构, 当声波发射装置分别位于井内深度 57.6 m (6 根油管), 96.3 m (10 根油管), 148.5 m (15 根油管), 192.1 m (20 根油管), 249.6 m (26 根油管), 288 m (30 根油管) 时, 将电脑与示波器接入地面接收装置, 分别录取信号情况, 图 5 为示波器录取的典型信号波形。

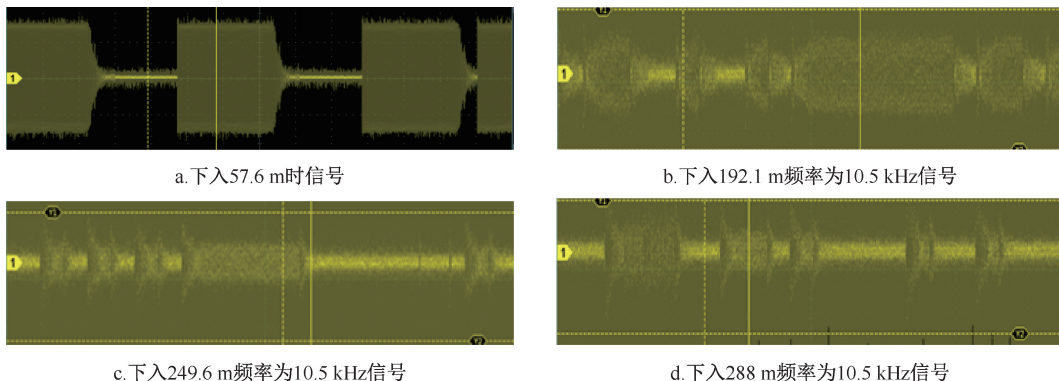


图5 示波器录取信号图

Fig. 5 Oscilloscope capture signal diagram

通过试验发现, 当声波发射装置下入到 57.6 m 时, 11 个发射频率均可被地面接受到, 均能被计算机正确解码; 随着仪器下深的增加, 地面所能监测到的信号频率逐渐减少, 至 192.1 m 时, 仅频率为 10.5 kHz 的信号能够被监测到, 此时所监测到的信号基本完整, 可正常识别与解码; 继续下入至 249.6 m 与 288 m 时, 仅有频率为 10.5 kHz 能被监测到, 但是整体信号完整度很差, 已无法正常解码与识别。通过本次试验表明, 井筒尺寸对声波信号在管柱中的传输距离具有一定影响, 10.5 kHz 附近载波频段传输距离较远。另外, 本次试验还发现, 井筒内介质对声波传输特性具有一定的影响。

2.4 泉 42-113X 井

为了更好的研究声波信号在油管中的传输特性, 了解声波信号受井筒尺寸、井内介质、载波频率以及传输距离之间的关系, 优选载波频率, 确定最大传输距离, 为后续声波无线中继器样机的研制提供指导。

地面声波传输性能试验显示, 介质为水时, 声波信号较优载波频段要高于在空气中的载波频段。基于文 23k-1X 井的试验结果, 确定载波频率为 12.5~14.5 kHz, 每隔 0.25 kHz 设置一个载波频率, 共设置 11 个载波频率。仪器接电后, 由声波中继器自动按照频率从低到高的顺序每隔 1 min 发射一组数据, 当声波发射频率达到 14.5 kHz 后, 声波中继器自动回到 12.5 kHz 的声波发生频率发射数据, 如

此往复发送数据,直至试验结束。

试验的井筒条件为 139.7 mm 套管,73 mm 油管,井筒灌满清水。试验时,采用 10 根油管+无线传输短节+油管的管柱结构。

图 6 显示,四种载波频率均呈现出随着下入深度的增加,信号衰减初期较快快,后期逐渐减缓,类似呈指数衰减规律。

图 7 为井声波发射装置下入深度为 227.6 m (24 根油管)时所测信号强度。由图可见,在该深度处载波频率为 13 kHz 时,信号强度最大,载波频率 13.25 kHz 信号强度次之,载波频率 13.75 kHz 信号强度最差,表明载波频率为 13 kHz 附近时,信号传

输效果较好。

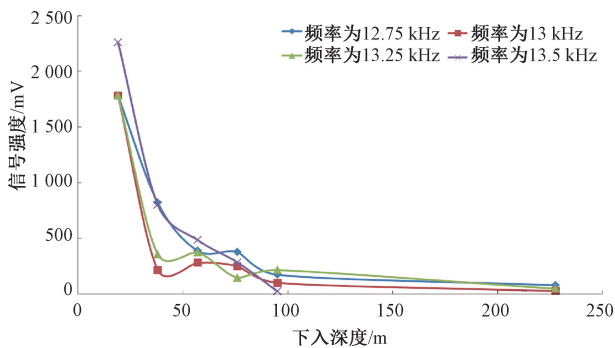
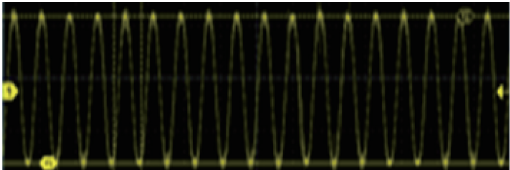
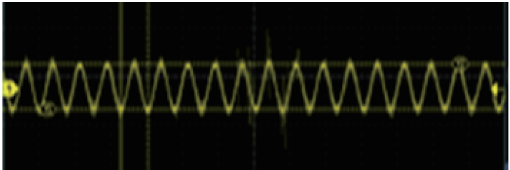


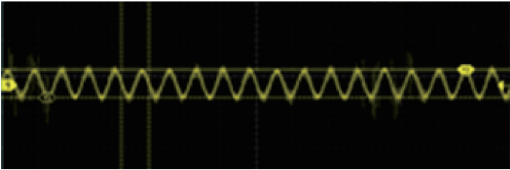
图 6 不同载波频率信号强度与下入深度管
Fig. 6 Signal strength and running depth of different carrier frequencies



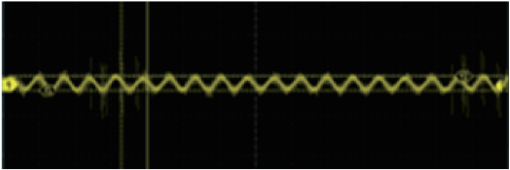
a. 频率为13 kHz



b. 频率为13.25 kHz



c. 频率为13.5 kHz



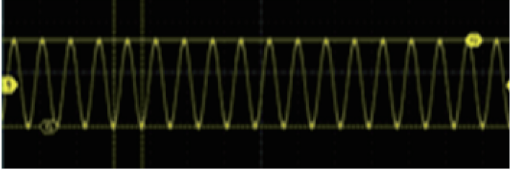
d. 频率为13.75 kHz

图 7 同一深度不同频率示波器录取信号

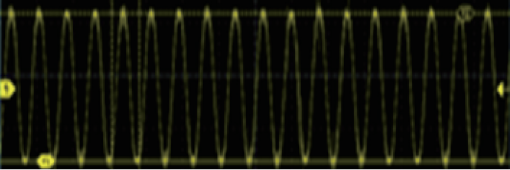
Fig. 7 Oscilloscopes with different frequencies at the same depth receive signals

图 8 为载波频率为 13 kHz 时,不同深度所录取的声波信号。由图 8 可知,在下入深度达到 805.3 m 时,所接收的声波信号信号特征能够识别,

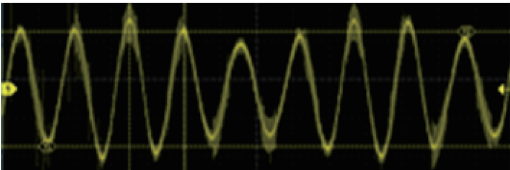
但轮廓模糊不清,信号畸变严重,不能通过电脑还原解码信号。由此可知,本套声波无线中继器的极限传输距离为 805.3 m。



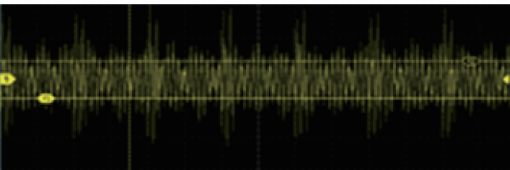
a. 深度95.11 m



b. 深度227.6 m



c. 深度417.08 m



d. 深度805.3 m

图 8 不同深度示波器录取信号

Fig. 8 Oscilloscopes with different depths receive signals

3 结论

(1) 声波沿油管的传输距离受井况的影响较大,井眼尺寸、油管长度以及套管内介质均对传输

特性均具有较大影响。
(2) 声波信号强度沿油管传输距离成指数衰减规律,前 40 m 内衰减较大,表明通过增大声波发射功率增加传输距离并不经济,需在单级传输距离与

发射功率之间寻求平衡点。

(3) 声波在油管中的传输规律呈现通、阻交替的梳状滤波特性,随着传输频率的增加,阻带变宽通带变窄;井内充满水时的有效传输频段较井内为空气的有效传输频段高。

(4) 通过电路优化与换能器频率的优选,能够有效增加声波中继器的无线传输距离。井筒充满液时,较优传输频段为 13.0~13.5 kHz,最大无线传输距离为 805 m。

致谢:感谢渤海钻探油气井测试分公司领导和同事在本文写作过程中的帮助和支持。

参考文献

- [1] 李志刚,管志川,王以法. 随钻声波遥测及其关键问题分析[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(9):11-14.
LI Zhigang, GUAN Zhichuan, WANG Yifa. Acoustic telemetry while drilling and analysis on its key problems [J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(9):11-14.
- [2] 李枝林,韩雄,庞东晓. 页岩气生产动态井下无线监测系统研制与应用[J]. 钻采工艺, 2022, 45(2): 143-148.
LI Zhilin, HAN Xiong, PANG Dongxiao. Development and application of dynamic downhole wireless monitoring system for shale gas production performance [J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(2): 143-148.
- [3] 刘慧. 随钻测量泥浆脉冲信号识别方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
LIU Hui. Research on identification method of mud pulse signal in MWD [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [4] 刘涛,朱礼斌,杨先辉,等. 基于电磁波的井下压裂无线传输信道性能分析研究[J]. 测井技术, 2018, 42(6): 715-719.
LIU Tao, ZHU Libin, YANG Xianhui, et al. Performance analysis of downhole fracturing wireless transmission channel based on electromagnetic wave [J]. Well Logging Technology, 2018, 42(6): 715-719.
- [5] 蔡鹏. 基于无线数据传输的海上多平台井眼防碰技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013:38-45.
CAI Peng. Research on offshore multi-platform borehole collision prevention technology based on Wireless data transmission [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013:38-45.
- [6] 李永钊. 无线钻井参数测量仪器的研究现状及发展趋势[J]. 石油管材与仪器, 2017, 3(1):18-21.
LI Yongzhao. Research status and development trend of wireless drilling parameter measuring instrument [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2017, 3(1):18-21.
- [7] 马东,师奕兵,张伟,等. 随钻数据声波 NC-OFDM 传输及噪声抑制的研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38

(1): 8-16.

- MA Dong, SHI Yibing, ZHANG Wei, et al. Research on acoustic NC-OFDM transmission and noise reduction for logging while drilling data [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 8-16.
- [8] 王婷婷,魏勇,余厚全,等. 井下过套管超声波无线能量传输系统研究[J]. 测井技术, 2021, 45(2):138-142.
WANG Tingting, WEI Yong, YU Houquan, et al. Research on ultrasonic wireless energy transmission system for downhole through casing [J]. Well Logging Technology, 2021, 45(2):138-142.
- [9] 姜楠. 新型低频电磁波井下数据无线传输技术[J]. 油气井测试, 2022, 31(6):54-58.
JIANG Nan. A new low-frequency electromagnetic wave wireless transmission technology for downhole data [J]. Well Testing, 2022, 31(6):54-58.
- [10] 吴琰,王芙蓉,韩雄,等. 金属套管对井下电磁波无线传输的影响[J]. 钻采工艺, 2023, 46(2):1-7.
WU Yan, WANG Furong, HAN Xiong, et al. Influence of metal casing on downhole electromagnetic wireless transmission [J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(2):1-7.
- [11] 赵新全,陈友学,赵亮. 井下无线电磁短传天线阻抗匹配分析与研究[J]. 石油管材与仪器, 2023, 9(5):8-11.
ZHAO Xinquan, CHEN Youxue, ZHAO Liang. Impedance matching of underground radio electromagnetic short-transmission antenna [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2023, 9(5):8-11.
- [12] 张宇飞,赵昆,王攀,等. 低频电磁波无线传输测试技术在阿北凹陷复杂断块油藏的应用[J]. 石油钻采工艺, 2021,43(3):328-333.
ZHANG Yufei, ZHAO Kun, WANG Pan, et al. Application of low-frequency electromagnetic wireless transmission test technology in the complex fault block reservoirs of Abei sag [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021,43(3):328-333.
- [13] 任陕海,付光杰,韩帅,等. 油田井下 WPT 系统磁耦合机构优化设计[J]. 吉林大学学报:信息科学版, 2023, 41(1): 37-42.
REN Shanhai, FU Guangjie, HAN Shuai, et al. Optimization design of magnetic coupling mechanism of downhole wpt system in oilfield [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2023, 41(1): 37-42.

编辑 穆立婷

第一作者简介:雷鹏,男,1983 年出生,博士,高级工程师,2015 年毕业于中国石油大学(华东)油气井工程专业,主要从事地层测试新技术引进与开发。电话:15263875876, Email:lei_peng@cnpc.com.cn,通信地址:河北省廊坊市广阳区万庄矿区油气井测试分公司,邮政编码:065007。