

# 井下电磁中继传输技术研究及应用

胡越发, 杨春国, 高炳堂, 王立双

中国石化石油工程技术研究院, 北京, 100101

**摘要** 钻井过程中, 可以通过随钻测量技术实时获取井下工程参数及地质参数。电磁随钻测量技术有着其他随钻测量技术难以比拟的优势, 但其易受到地层电阻率的限制, 导致电磁信号传输深度较浅, 因此电磁信号的传输深度是电磁随钻测量技术发展和应用的最大制约因素。分析表明, 采用中继传输技术是提高电磁信号传输深度最直接、经济的方法。为此, 开展了井下电磁信号中继传输特性理论研究, 确定了中继器电磁激励方式和天线结构, 建立了井下电磁信号中继传输模型; 设计了中继器开发方案。根据方案, 完成了中继器工程样机的研制, 并进行了现场应用实验。实验表明, 采用井下电磁信号中继传输技术可有效提高 EM-MWD 仪器的传输深度, 每级中继器可以提高传输深度 70% 以上, 从而使电磁信号的传输深度不再受制于地层电阻率, 拓展了 EM-MWD 仪器的使用范围。

**关键词** EM-MWD; 中继传输; 中继器

**中图分类号** TN929.4

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.15.010

## Research and application of downhole electromagnetic relay transmission technology

HU Yuefa, YANG Chunguo, GAO Bingtang, WANG Lishuang

Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China

**Abstract** In the drilling process real-time downhole engineering parameters and geological parameters can be obtained by the MWD technology which has greatly promoted the development of drilling technology. Electromagnetic MWD technology has unique advantages, but it is vulnerable to formation resistivity restriction and results in a smaller depth of electromagnetic signal transmission. Therefore, the transmitted depth of electromagnetic signal is the greatest constraint in the development and application of EM-MWD. The relay transmission technology is the best way to improve the transmission depth of electromagnetic signal. For this reason, in this paper theoretical research of electromagnetic signal transmission characteristics is conducted, and the electromagnetic excitation mode of repeater and the antenna structure are determined. Then an electromagnetic signal relay transmission model and a repeater development program are established. On this basis, the repeater and application experiments are developed. Experimental results show that the downhole electromagnetic relay transmission technology can improve the depth of EM-MWD. The transmission depth can be increased more than 70 percent by each repeater. Therefore, the use of EM-MWD is greatly expanded.

**Keywords** EM-MWD; relay transmission; repeater

随钻测量技术可以保证在钻井过程中, 实时获取工程参数及地质参数等井下信息, 促使钻井由盲钻向智能钻井发展。随钻测量有无线和有线两种信号传输方式, 与有线方式相比, 无线方式操作方便且使用成本较低, 是目前的发展方向<sup>[1]</sup>。无线随钻测量主要有泥浆脉冲、电磁波、声波等 3 种传输方式<sup>[2]</sup>, 其中电磁随钻测量传输速率高; 不受泥浆介质影

响, 可有效应用于欠平衡钻井<sup>[3]</sup>; 测量时可节约钻机作业时间; 安全性高且使用成本低, 具备其他两种电磁随钻测量技术难以比拟的优势。电磁波在井下的传输易受地层电阻率的限制, 信号传输深度较浅, 因此, 电磁信号的传输深度是电磁随钻测量技术发展和应用的主要瓶颈<sup>[4]</sup>。

提高电磁信号的传输深度, 国内外研究主要集中在: (1)

收稿日期: 2015-03-18; 修回日期: 2015-07-01

作者简介: 胡越发, 工程师, 研究方向为井下信息测量与控制技术, 电子邮箱: huyuef.sripe@sinopec.com

引用格式: 胡越发, 杨春国, 高炳堂, 等. 井下电磁中继传输技术研究及应用[J]. 科技导报, 2015, 33(15): 66-71.

提高地面接收能力,将湮没在噪声中的小信号提取出来<sup>[5-8]</sup>; 2) 延伸天线技术使用延伸电缆<sup>[9]</sup>,将发射机上移到接近地面的位置;3) 中继传输技术,进行接力传递。提高地面接收能力,由于信号处理技术的限制,提高信号传输深度有限;延伸天线技术中电路装卸操作复杂、费时,需配备电缆绞车等设备,仪器成本及使用成本较高。中继传输技术不仅可以极大提高电磁信号传输深度,而且装卸简单,使用成本低,可以很好地克服以上两种技术的缺陷。除 Halliburton 公司的相关专利外<sup>[10]</sup>,未检索到井下电磁中继传输技术研究及现场应用的报道。本文开展井下电磁信号中继传输特性理论研究,确定中继器电磁激励方式和天线结构,建立井下电磁信号中继传输模型,设计并开发中继器,用于提高 EM-MWD 系统中电磁信号的传输深度。

## 1 中继传输原理

### 1.1 井下电磁信号中继系统工作原理

井下电磁信号中继器的主要功能是实现井内电磁信号的转发,它集电磁信号的接收、发射功能于一体,安装在井下发射机的上部。当钻井井深大于电磁随钻测量信号的传输深度时,在钻柱上加装信号中继转发器。中继器接收井下发射机发出的电磁信号,经过解调、解码、功率放大等处理后重新编码调制,以不同的频率将该信号转发给地面接收机,从而实现井下电磁信号接力传输,其系统如图 1 所示。该技术

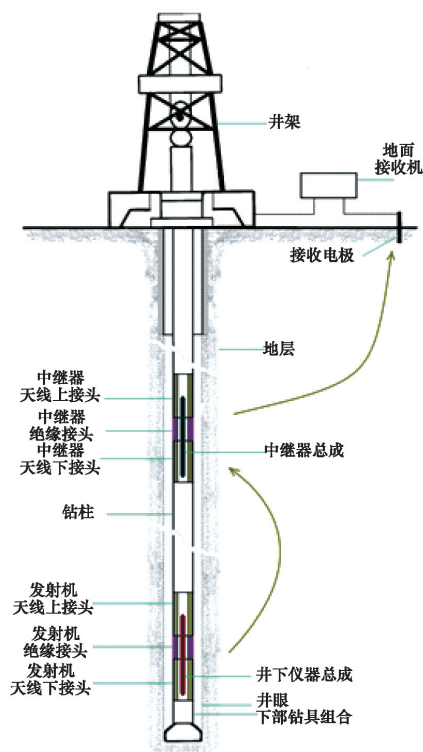


图 1 电磁中继系统示意

Fig. 1 Diagram of electromagnetic relay system

将大大提高地面接收的信号强度,使地面接收机能够接收到质量较好的电磁信号,从而增强电磁随钻测量系统对不同电磁环境的适应能力,提高测量深度。

### 1.2 中继器电磁激励方式及最佳井下天线结构

井下电磁中继传输技术的关键在于井下电磁信号的接收和转发,不仅需要能够准确捕获井下发射机发出的、已衰减的比较微弱的电磁信号,同时还要将该信号发射给地面接收机,因此中继器的天线需要同时负责电磁信号的接收和发射。在电磁波发射与传播中,天线起着至关重要的作用:发射天线把发射装置的能量转换为电磁波的能量,接收天线是把电磁波的能量转换成接收装置测量的能量,天线结构的优劣对电磁传输性能有非常大的影响<sup>[11]</sup>。

可实现的中继器天线电磁激励方式按电磁特性可分为垂直磁场法和垂直电场法两种。为了确定采用何种电磁激励方式,分别对地下垂直电偶极子和磁偶极子在地表产生的激励场进行计算,从而确定传输距离一定时使用何种激励方式地面接收机接收的信号更强<sup>[12]</sup>。

根据经典电磁理论可以推导出柱坐标系下,地下垂直电偶极子在地面上产生的场分量表达式;对于垂直磁偶极子,根据赫兹磁矢量满足的方程和边界条件及场分量与赫兹磁矢量的关系,同样可以得到垂直磁偶极子在地面上的场。

通过推导可以得出,两种偶极天线产生的电场在地面上的水平分量之比为:

$$\left. \frac{E_{0\varphi}^m}{E_{0\varphi}^e} \right|_{z=0} = \frac{s}{lh} \cdot T \quad (1)$$

式中,

$$T = \left\{ e^{ik_1 R_0} \left[ -2 + 2jk_1 R_0 - jk_1^3 h R_0 - \frac{2h^2 - \rho^2}{R_0^2} (5 - 5jk_1 R_0) + k_1^2 (5h^2 - \rho^2) + \frac{j\pi k_1 R_0}{4} D(h, \rho) \right] \right\} / (3 - 3jk_1 R_0 - k_1^2 R_0^2) e^{jk_1 R_0} \quad (2)$$

在  $|k_1 R_0| \gg 1$  的情况下,  $T \approx 1$  相比拟。公式(1)表示的电场水平分量之比主要由  $s/lh$  决定。根据随钻测量的实际情况,由于受钻铤直径的限制,磁偶极子的环面积  $s$  很小,而电偶极子的  $l$  可以做得较长。结合井场实际情况,可以得出地下电磁信号传输时,电激励比磁激励效率高得多,因此中继器的天线使用垂直电激励式天线结构。

常见的垂直电激励式天线结构包括线圈耦合和直接耦合两种,如图 2 所示。

由于地层结构相当复杂,为便于研究,一般情况下,可以将地层电磁介质看成平面分层结构。认为每层介质的电磁性能是均匀的,它的厚度依地质情况决定。平面分层模型可以分析层剖面的厚度、深度、电导率等因素对电磁波传输和接收天线处电场所造成的影响。为了研究方便,假设仪器工作在水平地层环境的垂直井中,这种情况下,井眼与分布地层垂直,收发天线和地层分布具有关于井轴的旋转对称性。

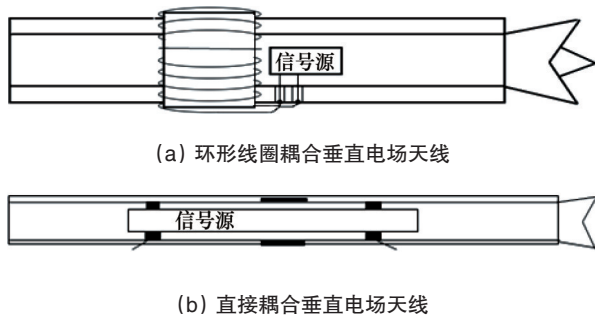


图2 井下电磁中继器系统天线基本结构

Fig. 2 Basic structure of downhole electromagnetic repeater system's antenna

根据推导,可以计算出不同天线结构在地面上的场分量  $E_\rho$ ,从而判断该天线结构在地面接收机处形成的信号强度。

$$E_\rho(\rho) = \frac{I_0}{2\pi\sigma(1 - e^{-2\gamma_0 h_1})} \int_0^{h_1} \left[ e^{-\gamma_0 z} - e^{-\gamma_0(2h_1-z)} \right] \cdot e^{jk(h_1-z)} \cdot \frac{3a\rho(h_1-z)}{(\rho^2 + a^2(h_1-z)^2)^{3/2}} dz \quad (3)$$

根据理论计算结果及偶极天线在电磁随钻测量系统上的应用情况,选择直接耦合的钻杆偶极天线作为中继器天线。

### 1.3 井下电磁中继传输理论模型

在对井下电磁信号传输过程进行模拟仿真时,由于井眼周围地层的几何结构和介质组成特性十分复杂,运算过程中产生的未知量和矩阵规模往往比较大,因此选择算法时最关键的参考因素就是其计算量和收敛速度。选择目前非常先进的高阶 hp 自适应目标导向有限元算法对井下中继器接收、转发电磁信号的过程进行模拟。

假设中继器工作在极低频环境下,发射源频率为 10~20 Hz,而井下发射机发射源频率为 5~10 Hz。此时井下发射机与中继器的天线感生电动势是由交变电流产生的,即麦克斯韦方程组中的场量是单频的谐振函数,因此求解的电磁场为时谐场问题。

根据电磁场特性及其在有耗介质(电导率不为零)中派生的衰减指数情况,可得出在时变环境下,中继器传播过程中主要存在理想导体边界、井下天线、阻抗边界(地层分界面处均为阻抗边界条件)等几种边界条件。

确定了系统波动方程和边界条件,下面可以开始正式对有限元模型进行求解,得到系统的弱形式化方程:

$$\int_{\Omega} \frac{1}{\mu} (\nabla \times E) \cdot (\nabla \times \bar{F}) dx - \int_{\Omega} (\omega^2 \epsilon - j\omega\sigma) E \cdot \bar{F} dx - \int_{\Gamma_r} jk\lambda E_T \cdot \bar{F}_T dS = -j\omega \int_{\Omega} J_{imp} \cdot \bar{F} dx + \int_{\Gamma_s} J_s^{imp} \cdot \bar{F}_T dS \quad (4)$$

获得了有限元问题的弱形式化方程后,即可使用求解器根据该方程进行求解。本项目选择的求解器是稀疏矩阵方程求解器 UMFPACK。

### 1) 均匀有耗介质模型。

井下电磁信号的传输信道由钻杆、泥浆、地层共同构成,由于边界条件复杂,模型的建立与求解难度较大,因此首先构建单一均匀地层模型,暂不考虑地层分层的影响<sup>[12-14]</sup>。

由于电场分布和地层分布具有沿井轴的旋转对称性,因此处于单一均匀地层、具有围岩、侵入带等影响因素的电磁中继传输系统及其所处的地层模型可以简化为图3所示的2D模型。

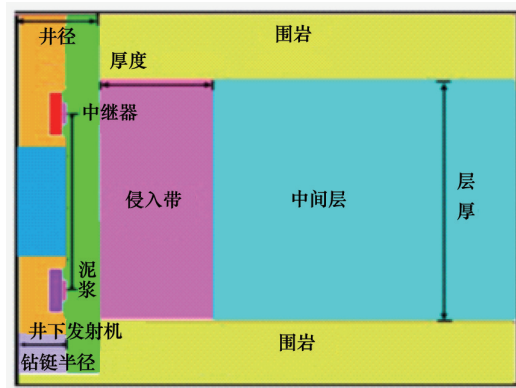


图3 均匀单一地层电磁中继传输系统2D模型

Fig. 3 2D model of electromagnetic relay transmission system in the uniform and single formation

井下电磁波传输过程中,地层电阻率和载波频率对信号衰减产生的影响最大。假设原状地层为均匀地层,上下围岩均为同向异性介质,层厚 1 m,围岩电阻率  $R_s$  为  $1 \Omega \cdot m$ ;井眼直径 216 mm (8 1/2 " );钻杆直径 165 mm;源距为发射天线中点到接收天线中点之间的距离,且源距 13 m;泥浆电阻率  $0.1 \Omega \cdot m$ ,侵入带厚度为 0.3 m,侵入带电阻率  $R_m$  为  $3 \Omega \cdot m$ 。此时改变地层电阻率值和发射信号载波频率,即可获得中继器天线处电压和电场强度与地层电阻率值、载波频率之间的关系(取接收天线中点为测量点)。

图4为计算得出的地层电阻率为  $150 \Omega \cdot m$  环境下井下发射机附近电场分布图。图5描述了仪器位于不同地层位置时电场线的分布情况。由于趋肤效应,电磁波更难穿透低电阻率的介质,因此在低阻层中电磁波传输的衰减速率远远大于在高阻层中的衰减速率。从图5中可以看出,地层电阻率越低,电场衰减的速度就越快,电场在地层中的分布范围就越小,证明信号传输距离越小。

改变地层电阻率和载波频率对有限元数学模型进行求解,即可得到中继器处电场强度与地层电阻率、电场强度与载波频率之间的关系。根据  $V(R_i) = \oint_{R_i} E(l) dl$ ,即可根据电场强度求出中继器天线上的电压值。根据瞬态场中电场强度和电压的关系可知,在中继器工作过程中,天线处电场强度和电压呈正比关系。因此电场强度的强弱也代表了接收到的电磁信号的强弱。图6描述了电场强度与载波频率、地层电阻率之间的关系。

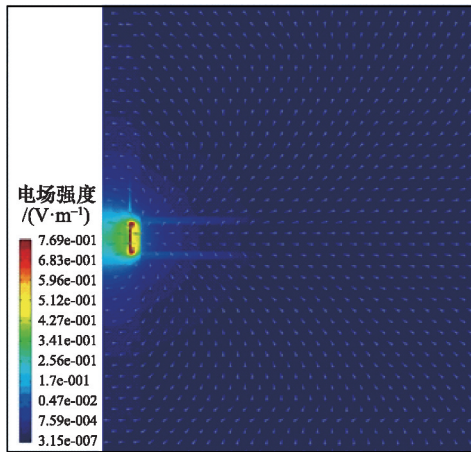


图4 150 Ω·m 地层中井下发射机天线附近电场分布  
Fig. 4 Electric field distribution near the downhole transmitter antenna in formation of 150 Ω·m

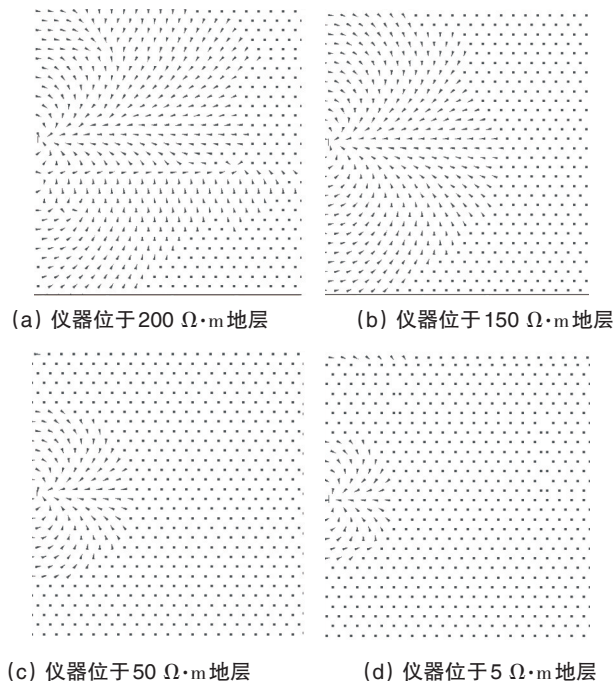


图5 仪器位于不同地层时电场线分布  
Fig. 5 Electric field distributions of different formations

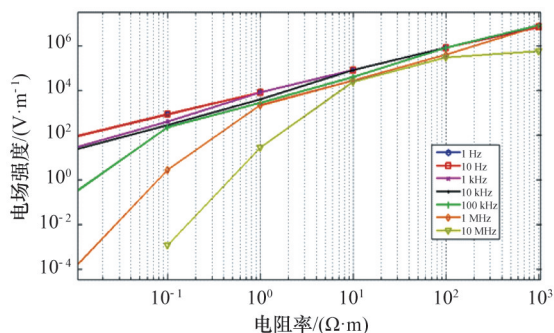


图6 不同载波频率下电场强随地层电阻率的变化  
Fig. 6 Electric field intensity curves with the formation resistivity in different carrier frequencies

如图6所示,当信号载波频率一定时,地层电阻率越低,中继器处电场强度就越低,接收到的信号强度就越弱,证明电磁波在低阻层传输时衰减比高阻层传输衰减严重。而当地层电阻率一定时,电磁信号频率越低,中继器处电场强度就越高,接收到的信号强度就越强,证明使用低频信号产生的衰减比甚低频信号衰减轻。

2) 非均匀地层介质模型。

钻井工程中,地层是各向异性的,为了深入探讨中继器传输特性,验证地层电阻率和载波频率对中继器工作性能的影响,建立不均匀地层条件下的传输信道模型<sup>[12-14]</sup>。为了方便对非均匀地层进行分析,将地层进行水平分层,并假定每层电磁特性参数不便,即每个水平分层是均匀的。非均匀地层电磁信号中继传输信道模型由钻头、钻铤、中继器、井下发射机、充满泥浆的钻铤周围环形空间及5个水平地层组成;其中中继器和井下发射机的天线都为耦合天线结构,5层地层假设均为水平均匀介质地层,且电阻率各不相同。模拟钻头从最上方500 Ω·m 地层到最下方10 Ω·m 地层的钻进过程,整个过程中每经过一点,就采用自适应有限元算法求解一次模型,计算钻头位于该处时,中继器天线上的电压。钻进过程仿真结束后,即可获得钻井过程中钻遇不同地层时中继器天线上的电压曲线。多次改变电磁信号频率重复仿真,即可获得不同载波频率下多条接收天线电压曲线,以此分析载波频率、地层电阻率对系统传输性能的影响。图7即为仿真得出的曲线,为了更好地表述载波频率、地层电阻率对电磁信号衰减的影响,采用井下发射机天线和中继器天线的电压幅度比值为横坐标,由于发射机天线上的信号强度一定,因此该比值越大,证明中继器收到的信号电压幅度越小,即信号衰减越严重。

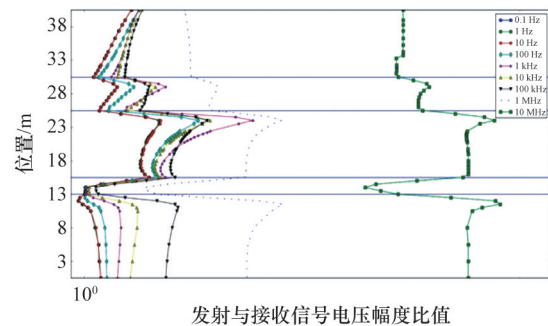


图7 不同载波频率下井下发射/接收信号电压幅度比曲线  
Fig. 7 Ratio curves of downhole signal voltage transmitted divided by signal voltage received in different carrier frequencies

由图7可知,建立的有限元数学模型能够比较准确地得出仿真电磁信号在地层中的传输过程,获得的电压曲线呈现非常明显的分层特性,同时清晰地展现出电磁波在地层中的传输特性。当载波频率逐渐升高时,幅度比曲线逐渐往右侧偏移,此时发射的信号和接收到的信号电压比值逐渐增大,信

号的衰减越来越强烈。而系统在不同电阻率地层中工作时,地层电阻率越小,幅度比曲线越靠右,证明衰减越强烈,与前面的仿真结果相同,与实际物理规律也相符。

### 3) 水平井、定向井中继电磁信号传输模型。

随钻测量系统常用于水平井与定向井的钻井中,因此对水平井和定向井情况下的电磁波随钻传输信道特性进行研究是必要的。对于定向井与水平井,其模型与直井的模型相比更复杂,在建立数学模型时需要将矢量场进行分解,分解为垂直场和水平场进行计算<sup>[15]</sup>。

计算分析表明:

(1) 水平井情况利于信号的传输。水平段的影响大小,与垂直井的深度和水平井段的长度有关。当垂直段大于水平段长度时,水平段的影响很小;随着水平段的长度增加,水平段的影响加大。当垂直深度小,水平段长时,才应考虑水平段的影响,一般情况下可以忽略其影响。

(2) 定向井中斜井段对信号的影响很小。地面的场主要由接近地面的上部钻杆上的电流产生,因此,钻杆对电流的引导对信号传输起着关键的作用。

## 2 中继器研制

中继器接收井底发射机信号并非只是简单地放大转发,而是接收信号后,通过解调、解码,还原出测量数据,然后重新进行编码、调制,通过中继器发射机发射,不但保证了信号质量,还有利于实现多级中继。

中继器要实现的最重要功能就是井下数据的实时接收和转发,为了防止接收速度过快造成数据丢失,每接收到1位数据后需在很短的时间内完成所有数据处理和计算。为了以上目的,除了采用高性能的硬件平台,在软件开发过程中采用了计算相关算法硬件加速来提高计算速度。改进后的井下数据处理平台处理1位数据只需90 ms,远远超出系统最低要求。

电磁随钻测量系统所用中继器主要由接收/发射天线、接收处理器模块、信号转发处理器模块和电源模块4部分组成。中继器原理框图,图8如下。

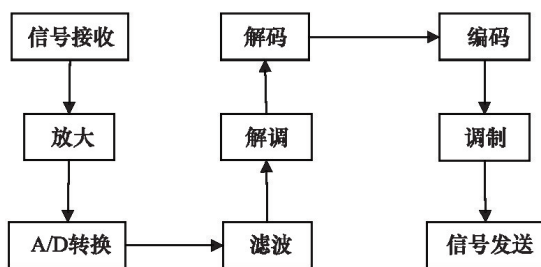


图8 中继器原理

Fig. 8 Block diagram of repeater

接收处理器是中继器的核心部分,也是实现信号中继的关键部件,其功能相当于地面接收机,要具备地面接收机中

信号采集、放大、A/D转换、数字信号处理等功能,即完成中继信号发射前的所有信号处理任务。

信号转发处理器接收信号接收处理器发送的信息,进行相应处理后,由信号发送/接收天线转发。信号转发处理器的调制信号以不同于井下发射机的频率发射。

中继器天线既完成井下发射机信号的接收,又实现中继信号的发射,天线主要由上下调整接头、绝缘接头组成。其中,上下调整接头实现与上部和下部钻具的匹配连接,可根据现场使用的不同的钻柱扣型更换。绝缘接头将钻柱分隔成上下绝缘的两段,作为天线的两极,实现中继信号的发射。

井下供电采用高温锂电池组,单组电池可保证中继器工作120 h以上。

## 3 实验结果

临盘油区商64-21井为直井,设计井深2500 m,实钻井深2517 m,套管下深200 m。经验数据表明,该地区电磁随钻测量传输深度最大只能达到1600 m。在实验过程中,由于地层电阻率较低的限制(地层电阻率为2~3 Ω·m),加之井下发射机和中继器之间的相互影响,井下发射机的传输深度只有1478 m左右。通过中继器,成功将电磁随钻测量仪的传输深度扩大至2517 m。

松辽油区胜利1井为预探井,直井,设计井深4330 m,套管下深849 m。由于该地区地层电阻率较低(地层电阻率为3~4 Ω·m),井下发射机的有效传输距离只有2100~2200 m左右,距离继续增加则地面接收机的解码误码率增加,仪器可靠性降低。加装中继器后,整套随钻测量仪的传输深度达到3521 m。仪器入井26 h,整个过程全套系统工作良好、运行稳定。

## 4 结论

随着欠平衡钻井、气体钻井技术的推广应用,电磁波传输技术的应用也越来越多,其主要特点是:传输不受钻井液介质影响、不用开泵循环即可传输信息、速率高、使用成本低。虽然EM-MWD系统相对于常规MWD的优势明显,但由于电磁波传输深度受地层电阻率的影响,目前EM-MWD系统的最大传输深度记录为4500 m左右,还无法替代常规MWD在深井、超深井中应用。

中继器不但保证了信号质量,还有利于实现多级中继,对于进一步提高EM-MWD的传输深度有着深远影响。随着中继器的应用,电磁信号的传输深度不再受制于地层电阻率,极大拓展了EM-MWD仪器的使用范围,必将能够促进EM-MWD的广泛应用,从而产生巨大的社会效益。

### 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, 17(2): 126-128.  
Zhang Tao, Yan Taining, Lu Chunhua. The principles and application of

- wireless MWD system[J]. West-China Exploration Engineering, 2005,17(2): 126-128.
- [2] 袁鹏斌, 余荣华, 欧阳志英. 无线随钻测量信息传输的现状与问题[J]. 焊管, 2010, 33(10): 65-69.  
Yuan Pengbin, Yu Ronghua, Ouyang Zhiying. The current status and problems of wireless signal transmission in measurement while drilling[J]. Welded Pipe and Tube, 2010, 33(10): 65-69.
- [3] 李田军, 鄢泰宁. 试论欠平衡钻井中应用电磁波随钻测量技术的若干问题[J]. 地质科技情报, 2005, 24(7): 37-39.  
Li Tianjun, Yan Taining. Some issues of electromagnetic MWD applied to under-balanced drilling[J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(7): 37-39.
- [4] 刘修善, 侯绪田, 涂玉林, 等. 电磁随钻测量技术现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(5): 4-9.  
Liu Xiushan, Hou Xutian, Tu Yulin, et al. The status and development trend of electromagnetic MWD technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(5): 4-9.
- [5] 龙玲, 陈庆, 刘飞. 电磁波随钻测量干扰信号消除算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2144-2152.  
Long Ling, Chen Qing, Liu Fei. Research on eliminating interference signal algorithm of EM-MWD[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(9): 2144-2152.
- [6] 王洪亮, 董浩斌, 蒋国盛. 基于相关自适应器的EMMWD信号检测系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(5): 1013-1018.  
Wang Hongliang, Dong Haobin, Jiang Guosheng. Design of EMMWD signal detection system based on correlation and adaptive filter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(5): 1013-1018.
- [7] 李林, 弓志谦, 王磊, 等. 扩展EM-MWD传输深度及提高可靠性的方法与对策[J]. 钻采工艺, 2010, 33(4): 25-27, 38.  
Li Lin, Gong Zhiqian, Wang Lei, et al. The methods and countermeasures of expanding EM-MWD transmission depth and improving the reliability [J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(4): 25-27, 38.
- [8] Raab F H. Noise model for low-frequency through the earth communication [J]. Radio Science, 2010, 45(6): 1-7.
- [9] 张东旭, 白璟, 谢意, 等. 电磁波接力传输随钻测量系统研制与应用[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 76-80.  
Zhang Dongxu, Bai Jing, Xie Yi, et al. Development and application of an electromagnetic relay transmission MWD system[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(2): 76-80.
- [10] Robbins C A, Linyaev E, Li G. Wireless Telemetry Repeater Systems And Methods: US, 20100182161[P]. 2010-07-22.
- [11] 殷科生, 盛旺, 刘文彦. 以钻杆为天线的钻井遥测系统的研究[J]. 长沙大学学报, 2005, 19(5): 60-61.  
Yin Kesheng, Sheng Wang, Liu Wenyan. Research on drilling telemetry system with drill rod as antenna[J]. Journal of Changsha University, 2005, 19(5): 60-61.
- [12] 李晓. 电磁双向信号传输遥测通道的研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.  
Li Xiao. Study of EM-MWD dual-directional transmission[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.
- [13] 熊皓, 胡斌杰. 随钻测量电磁传输信道研究[J]. 地球物理学报, 1997, 40(3): 431-440.  
Xiong Hao, Hu Binjie. Research on electromagnetic propagation channel of MWD[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(3): 431-440.
- [14] 熊皓, 胡斌杰. 随钻测量电磁信道分析的等效传输线法[J]. 电波科学学报, 1995, 10(3): 8-14.  
Xiong Hao, Hu Binjie. The equivalent transmission line method of electromagnetic channel analysis[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1995, 10(3): 8-14.
- [15] 刘修善. 井眼轨道几何学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.  
Liu Xiushan. Geometry of wellbore trajectory[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.

(责任编辑 吴晓丽)

## ·学术动态·



## 中国水利学会第十次会员代表大会在北京召开

2015年6月30日,中国水利学会第十次会员代表大会在北京召开。中国科协党组书记、常务副主席、书记处第一书记尚勇,水利部党组书记、部长陈雷出席会议并讲话。中国水利学会第九届理事会理事长敬正书作工作报告。学会各理事单位、各专业委员会及各省(自治区、直辖市)水利学会的代表200余人出席会议。

本次大会采用无记名投票方式,选举产生了172人组成中国水利学会第十届理事会,选举产生47人组成的第十届理事会常务理事,选举十二届全国政协提案委员会副主任、水利部原副部长胡四一为第十届理事会理事长,顾浩为第十届理事会常务副理事长,匡尚富等9人当选为副理事长,于琪洋为秘书长。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/16491514.html>。