

近钻头随钻测量系统及其小型化设计关键技术分析

韦海瑞¹, 朱芝同^{*1}, 吴川², 邵玉涛¹, 赵洪波³, 刘广¹,
贾炜¹, 董巍¹, 张化民¹, 贾明浩¹, 薛倩冰¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000;

2. 中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北武汉 430074;

3. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083)

摘要:近钻头随钻测量技术是石油钻井领域最具有发展前景的高新技术之一,它以近钻头地质参数与工程参数的随钻测量、传输、信息解释、决策控制为主要技术特征,能有效提高油气层钻遇率、降低钻井成本。本文介绍了近钻头测量系统国内外的发展与应用现状,阐述了系统的工作原理、结构组成与特点,为满足小口径钻进对近钻头测量技术的需求,提出了小型化设计亟待攻克的关键技术难题,包括电磁波无线通信抗干扰技术、小直径涡轮发电技术、井下MEMS传感器技术等,为今后小直径近钻头测量系统研发提供技术基础。

关键词:近钻头随钻测量;小口径钻进;电磁波无线通信;涡轮发电;MEMS传感器

中图分类号:P634; TE92 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)05-0156-07

Analysis on current status and key technology of miniaturization design of near-bit MWD systems

WEI Hairui¹, ZHU Zhitong^{*1}, WU Chuan², SHAO Yutao¹, ZHAO Hongbo³, LIU Guang¹,

JIA Wei¹, DONG Wei¹, ZHANG Huamin¹, JIA Minghao¹, XUE Qianbing¹

(1. Institute of Exploration Techniques, CSGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences,

Wuhan Hubei 430074, China;

3. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China)

Abstract: Near-bit MWD technology is one of the most promising new technologies in the field of petroleum drilling. It is characterized by near-bit geological and engineering parameter measurement while drilling, transmission, data interpretation and decision control, which can effectively improve the oil and gas zone intersection rate and reduce drilling cost. In this paper, the development and application status of near-bit measurement systems at home and abroad are introduced, and the working principle, structure composition and characteristics of the system are described. In order to meet the demand of small diameter drilling for near-bit measurement technology, the key technical problems to be solved in miniaturization design are put forward. They includes electromagnetic wave wireless communication anti-interference technology, small-diameter turbine power generation technology, downhole MEMS sensor technology, near-bit measurement data interpretation technology, etc, which provides technical basis for the research and development of small diameter near-bit measurement systems in the future.

收稿日期:2022-06-07; 修回日期:2022-08-09 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.05.021

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“智能化深部钻探技术升级与应用示范”(编号:DD20211421)

第一作者:韦海瑞,男,汉族,1988年,工程师,机械设计专业,长期从事钻探设备研发及钻探工艺研究工作,河北省廊坊市金光道77号,422607217@qq.com。

通信作者:朱芝同,男,汉族,1986年生,高级工程师,地质工程专业,硕士,主要从事地质钻探工艺及器具的研究工作,河北省廊坊市金光道77号,zhuzt@mail.cgs.gov.cn。

引用格式:韦海瑞,朱芝同,吴川,等.近钻头随钻测量系统及其小型化设计关键技术分析[J].钻探工程,2022,49(5):156-162.

WEI Hairui, ZHU Zhitong, WU Chuan, et al. Analysis on current status and key technology of miniaturization design of near-bit MWD systems[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):156-162.

Key words: near-bit measurement while drilling; small diameter drilling; electromagnetic wave wireless; turbine generator; MEMS sensor

0 引言

在油气资源勘探开发过程中,近钻头测量系统是实时获取近钻头区域数据的重要手段,它是利用近钻头地质参数、工程参数测量和随钻控制技术手段来指导钻头一直沿着设计轨迹或者“甜点区”钻进,从而提高油气层钻遇率,减少钻井成本^[1]。近钻头测量系统是综合了钻井、测井、信号采集、自动控制、机械设计与制造等多学科的一种高新技术,在石油天然气定向钻井中必不可少。然而在地质钻探领域,多为小口径取心钻进,限制了近钻头随钻测量系统的推广应用。随着钻井技术的发展和公益性地质调查项目的不断实施,小口径油气钻井和地质勘探孔越来越多(口径多在152.4 mm以下),尤其是小口径定向井、水平井钻进,工程人员需要获取近钻头处的钻压、扭矩、振动、压力、温度等工程参数以及顶角、方位等轨迹参数,及时掌握钻具的实际工作状态与钻孔轨迹,确保钻具与钻进过程安全可控^[2-4]。随着微纳电子技术的飞速发展和微机电系统(MEMS)智能传感器产品的不断完善,使得小口径井下近钻头测量系统的研发成为可能。基于此,本文对近钻头随钻测量系统的国内外研究现状及工作原理进行了分析总结,并提出了小口径近钻头随钻测量系统的技术难点,以期给相关从业者提供借鉴。

1 近钻头测量系统国内外研究现状

1.1 国外研究现状

国外研究井下近钻头测量系统时间早于国内,而且发展速度很快,取得了较好的经济效益。以近钻头测量为特征的近钻头地质导向系统是21世纪石油钻井领域的一项重大创新技术,美国、英国、澳大利亚、挪威等国家采用该技术完成的钻井数量逐步增多,钻井周期逐步缩短,钻井成本显著下降。

20世纪90年代初,史密斯公司(Smith International)提出了近钻头测量概念,并申请了专利,该方案主要包括近钻头传感器模块、控制模块2部分,2个模块均包含一个内置环状天线的收发器。传感器模块位于动力钻具下方近钻头处,负责采集井下数据并将数据调制为电磁信号加载至发射天线,位于

动力钻具上方的控制模块对该电磁信号进行接收解调,从而获取传感器采集的原始数据,通过随钻测量系统(MWD)再将数据传输至地表^[5]。1993年,斯伦贝谢公司(Schlumberger)研发了一套无线传输系统,分别在钻头附近钻铤及上部钻铤安装了环状天线收发组件,用于收发近钻头数据,该系统没有将数据直接发给随钻测量系统,而是新增了一个声波收发装置将数据传输至地面。进入21世纪以来,大型油服公司也相继开发并完善了近钻头测量系统,贝克休斯公司、斯伦贝谢、哈利伯顿为主要技术拥有公司,生产8种产品约20个系列,可测量参数30多项,基本上能够满足各种井型的需要,但是对外仅提供技术服务,不出售测量设备,且服务价格十分昂贵。其中代表性的测量系统有^[6]:

(1)贝克休斯公司(Baker Hughes)的NaviGator系统,测井仪器位于钻头后1~4 m,可以测量井斜、电阻率、方位、伽马射线等参数。

(2)斯伦贝谢公司的EcoScope多功能随钻测量系统,可以测量多种近钻头参数,主要包括伽马射线、电阻率、密度、孔隙度、环空压力、井径、振动等参数。

(3)哈利伯顿公司(Halliburton)的ABI系统,可测量近钻头处的井斜、伽马、电阻率等参数。

1.2 国内研究现状

与国外相比,国内在近钻头测量系统方面的研究起步较晚,目前尚无成熟的产品使用。1994年,中国石油勘探开发研究院对该技术开展了技术探索与储备工作,1999年进行技术攻关研制出一套带近钻头传感器的地质导向钻井系统CGDS-1,该系统可以测量井斜、电阻率、伽马等参数,总体达到了国外20世纪90年代的水平^[1]。2007—2010年,大庆钻探工程公司钻井工程技术研究院成功研制了DQN-BMS-1近钻头地质导向测井系统,该系统具有多参数测量、测点距离近(部分参数小于1 m)、测量精度高等特点,显著提高了油层砂岩钻遇率,为水平井尤其是薄差油层水平井开发提供了技术保障^[7]。2012年,胜利伟业石油工程技术服务有限公司研制成功了MWD近钻头无线地质导向系统,测量仪器距离

钻头 2.8 m,采集的数据经过调制后通过无线电波方式传输给螺杆钻具上部的无线短接收系统,解调后即可获得近钻头数据参数^[5]。2012—2014年,长城钻探工程公司在已有随钻测井系统(LWD)基础上成功研制了GW-NB近钻头地质导向系统,仪器总长度仅1 m,直接与钻头连接,仪器测量零长仅为0.5 m,这种设计大大降低了仪器维修成本和缩短了仪器维保时间。近年来,北京六合伟业与西部钻探工程院共同开发了XZ-NBMS型随钻近钻头测量系统,近钻头测量参数有井斜和动态方位伽马成像,采用电磁波无线短传系统,测量精度高、传输稳定。仪器外径目前有 $\varnothing 172$ 、 $\varnothing 133.4$ 、 $\varnothing 105$ mm等规格,针对小型化应用需求,目前正致力于小口径测量系统的研发^[8]。2019年渤海钻探定向井公司自主研发BH-NWD近钻头方位伽马测量系统,和传统伽马测量仪相比零长短,能更早探测到地层岩性的变化,并且具有上伽马和下伽马2条伽马曲线,水平井储层钻遇率均达到93%以上,目前已在华北油田、山西煤层气田、四川页岩气田等多个油气田成功完成20余口水平井的随钻地质导向测量作业^[9]。近年来,中国石油大学、东北石油大学、山东

大学、中国地质大学等高校也相继开展了近钻头测量与数据传输系统的研究,研究工作内容都是侧重系统模型的仿真分析及地面模拟实验,未能真正用于实际生产中,后续还需要对该系统进行深入研究。

2 近钻头测量系统工作原理、结构组成与无线传输方式

2.1 测量原理与系统组成

近钻头测量系统由近钻头测量短节和近钻头接收短节2部分组成(见图1),二者之间通过无线传输系统进行信号传输,传输方式主要有泥浆脉冲传输、电磁波传输和声波传输。近钻头测量短节与钻头连接,主要由传感器、发射天线、控制电路、电池组等组成。控制电路是为了获取地质参数和工程参数等井下数据,然后做出处理并将信号传输给发射天线,发射天线将信号以电磁波形式发射给接收天线。近钻头接收短节位于螺杆钻具上方,主要由接收天线、控制电路、电源电路、存储器等组成,负责接收发射天线传输过来的信号,然后将信号进行处理存储。在近钻头地质导向系统中,接收短节还能与MWD系统进行通讯,通过MWD系统将数据上返给地面。

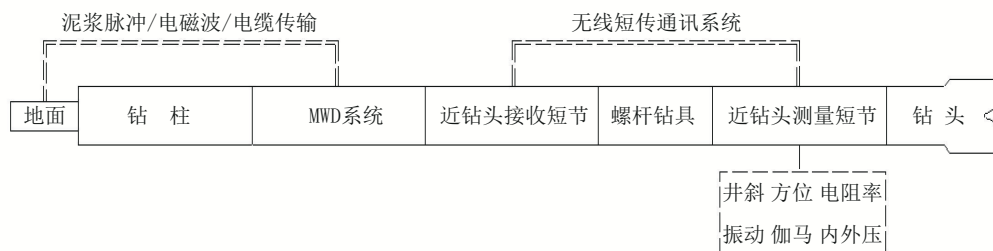


图1 近钻头测量系统组成示意

Fig.1 System composition diagram

2.2 电磁波传输系统工作原理

声波和电磁波在近钻头无线短传通讯系统方面都有应用,与声波短传不同,电磁波因其传输信号频带更宽、所需功率更低且不易受到井下噪声干扰,加之电磁波短传技术非常成熟,因此在近钻头测量无线短传通信系统中应用比较广泛。

电磁波短传无线通信系统主要由发送设备、接收设备、电磁信道3大部分组成(见图2),其中发送设备由传感器、信号调制器、功率放大器和发射天线组成,接收设备由接收天线、信号放大器、滤波器和

信号解调器组成,电磁信道一般由钻具、裸露的井壁和它们之间的钻井液及周围的地层共同组成。

电磁波无线短传技术是利用甚低频/低频电磁波进行信号远程传输的技术。电磁波短传无线通信系统工作原理为:井下传感器采集的数据基本上为数字信息,调制电路需要将数字信号转变为在通信信道传输的某一频率的模拟信号,该模拟信号经功率放大后由发射天线发射至由钻井液、钻柱及井下环空构成的电磁信道中。依据电磁感应电流场基本原理,接收天线在交变的磁场作用下将感应到的电

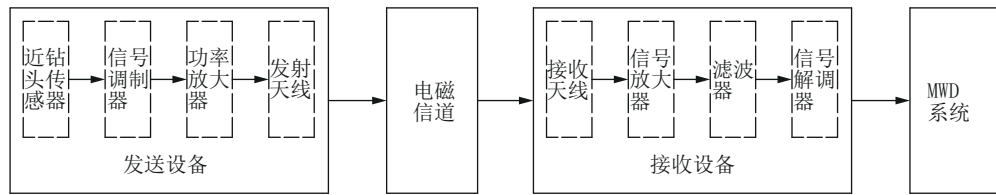


图 2 电磁波无线短传通信系统组成示意

Fig.2 Schematic diagram of the electromagnetic short wireless communication system

磁信号转换为电信号,经放大滤波,然后进行信号解调即可获取近钻头传感器的原始数据信息,最终实现近钻头数据信息的无线短距离传输。

3 小型化设计关键技术分析及实现建议

与传统石油钻井相比,小口径钻进技术所需钻井设备小而少,消耗的材料、燃料、专用管材少,井场占地面积小,有助于降低勘探成本和提高经济效益,

在石油钻井中,国外小口径尺寸定义已经缩小到 $\varnothing 98.4$ mm 甚至更小的 $\varnothing 82.6$ mm,国内小口径尺寸主要为 $\varnothing 152.4$ mm 和 $\varnothing 120.7$ mm。我国小口径定向钻具还没有成熟的尺寸系列,小口径近钻头测量系统开发也处于初步研究阶段,本文通过 $\varnothing 96$ mm 口径近钻头测量系统(见图 3),重点分析电磁波无线传输技术、井下自发电技术及 MEMS 传感器技术在小型化设计中的实现建议。



图 3 $\varnothing 96$ mm 口径近钻头测量系统方案示意

Fig.3 Schematic diagram of the "H" size near-bit measuring system

3.1 电磁波无线传输技术

电磁波无线传输不需要钻井液作为信号载体,对欠平衡钻井工艺有更好的适应性,但随着地层介质对信号的吸收,石油钻井中其应用深度受到很大限制,一般不超过 3000 m^[10]。与石油钻井不同,地质钻探尤其是小口径深部地质钻探多数为火山岩或者变质岩地层,地层电阻率较大,电磁波信号衰减减小,载波频率选择范围更广,这对信号传输是有利的,同时由于井眼尺寸的减小,收发线圈结构尺寸相应减小,会降低信息的传输距离和效率。解决方案可从以下 3 方面着手,一是对发射天线进行改进研究,在尺寸及发射距离之间寻找最佳点,以满足小口径近钻头随钻测量系统要求,比如 Scientific Drilling International 公司的 EM-MWD 产品,其工作原理是从地表经钻杆下入电缆,并将电缆与发射端对接形成延伸发射天线,从而提高信号传输深度,传输距离可达 4000 m,且传输速度也较为快速。二是对在电磁波微弱信号处理技术进行研究^[11-13],从而在减少天线尺寸的同时减少信号的失真程度,最大程度的提高发射距离。三是可采用信号中继站技术(见图

4),在钻柱上设置分布式的信号中继站,上一级中继站接收到信号后对信号进行解调及重新调制,从而达到信号修正的目的^[14-16],随后将调制过的信号重新发送,从而实现利用“信号接力”技术将井下信号有效高速地传递到地表。

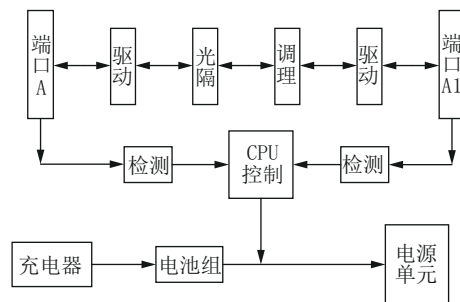


图 4 信号中继站实现方案

Fig.4 Structure block diagram of the signal relay station

3.2 小直径涡轮发电技术

在深井甚至超深井近钻头测量过程中,采用锂电池对测量仪器供电已经不能满足井下高温高压环

境要求,受电池容量限制,仪器持续工作时间也会受到限制,采用钻井液动力驱动涡轮发电机进行发电是一种有效的供电方式。涡轮发电机主要由涡轮机构和发电机 2 部分构成,图 5 所示为一种旋转磁极式涡轮发电机结构,其工作原理是钻井液驱动涡轮旋转,涡轮带动安装有永磁体的外壳转子旋转,发电机定子轴上装有线圈绕组,线圈切割磁力线从而产生交流电。考虑其小型化设计,需要对其结构紧凑性和工作高效性提出更高要求,主要有发电机电磁结构和参数优化设计、涡轮结构形式与结构参数优化设计及其精密制造等^[17-20]。

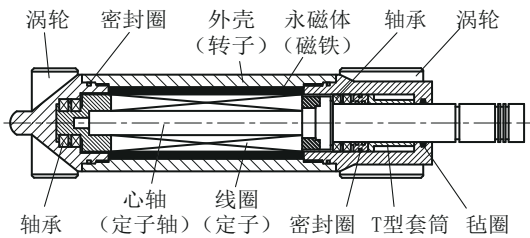


图 5 涡轮发电机结构

Fig.5 Schematic diagram of the turbine generator structure

斯伦贝谢、贝克休斯、哈利伯顿、俄罗斯 SAGOR 公司的井下涡轮发电机技术成熟,国内也有数家科研单位研发了多种型号的井下涡轮发电

机,但多数是针对井下大功率(≥ 200 W)仪器研制的,驱动钻井液排量较大,且其外径多在 100 mm 以上,不适用于小口径^[21-22]。图 6 为俄罗斯 SG072 (左)和 SG074(右)型号涡轮发电机,其中 SG074 型涡轮发电机涡轮直径为 89 mm,外壳直径为 80 mm,功率为 30~550 W,所需钻井液排量 7~20 L/s,满足一般地质钻探小口径的尺寸需求,有望用于小口径近钻头随钻测量系统的实时供电。



图 6 俄罗斯 SAGOR 公司 SG 型泥浆涡轮发电机
Fig.6 Type SG mud turbine generator from SAGOR, Russia

3.3 MEMS 传感器技术

微机电系统内部结构一般在微米甚至纳米级,是一个集微传感器、微执行器、微机械机构、微电源、信号处理及控制电路、接口及通信等于一体的独立的智能系统^[20],其结构组成见图 7。

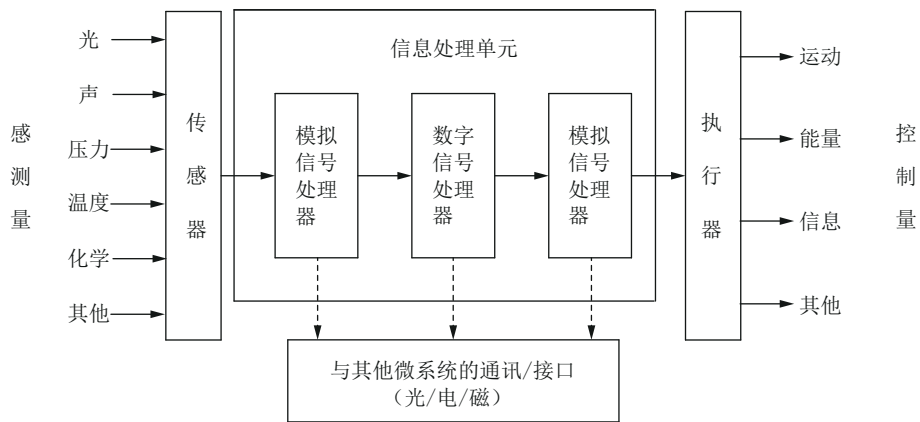


图 7 MEMS 传感器基本构成

Fig.7 Basic structure of the MEMS sensor

MEMS 传感器凭借其体积小、质量轻、可靠性高、灵敏度高、易于集成等优势,正在逐步取代传统机械传感器,常见的 MEMS 传感器有压力传感器、温度传感器、加速度传感器、陀螺传感器等。由于

MEMS 传感器具有极小的尺寸和高集成度的特性,能有效适应井下狭小的安装环境,且 MEMS 传感器具有良好的抗振动、抗冲击能力,近年来该类传感器在井下工具中也获得了越来越广泛的应用,斯伦贝

谢公司率先将MEMS陀螺传感器应用于随钻测量工具,西安交通大学针对矿井的环境需求采用了新的设计思路研制了大量程的高温高压传感器,该传感器的外尺寸仅为 $4000\ \mu\text{m}\times 4000\ \mu\text{m}\times 525\ \mu\text{m}$ 。重庆大学为了降低MEMES传感器在井下环境的误差,提出了角差补偿安装法。中科院地质与地球物理研究所开展了基于MEMS加速度计的近钻头动态井斜测量系统研究,测量单元将5个MEMS加速度计集成于独立的一个短节上,在动态情况下测量精度达到了 $0.5^{\circ[23]}$ 。中煤科工集团西安研究院有限公司、中国地质大学(北京)等也开展了基于MEMS传感器的井眼轨迹测量系统的误差校正研究,能够满足实际井下钻探工艺的精度需求^[24-25]。

4 结论与建议

(1)近钻头随钻测量及无线短传技术在石油钻井领域已经广泛应用,国内在井下近钻头测量系统的研究已趋于成熟,但在测量精度、应用深度、可靠稳定性等方面,与国外还存在差距。

(2)小口径近钻头测量系统处于初步研究阶段,针对小口径钻进近钻头测量系统应用需求,目前小型化设计急需攻克的关键技术包括小尺寸电磁波天线设计及信号处理技术、小直径涡轮发电机设计技术、井下小型传感器及测控系统设计等相关技术。近钻头随钻测量系统研发涉及技术领域广泛,是一个复杂的系统工程,需要发挥科研院所、高校和企业各自优势,强化“产学研用”深度融合,在关键技术和“卡脖子”难题上取得突破,共同推动智能化钻井技术发展。

参考文献(References):

- [1] 苏义脑.地质导向钻井技术概况及其在我国的研究进展[J].石油勘探与开发,2005,32(1):92-95.
SU Yinao. Geosteering drilling technology and its development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005,32(1):92-95.
- [2] 伍晓龙,朱芝同,董向宇,等.小口径油气地质调查井的问题与工程实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):27-32.
WU Xiaolong, ZHU Zhitong, DONG Xiangyu, et al. Problems and field cases of small-diameter oil and gas geological survey wells [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(11):27-32.
- [3] 吴纪修,尹浩,张恒春,等.水平定向勘察技术在长大隧道勘察中的应用现状与展望[J].钻探工程,2021,48(5):1-8.
WU Jixiu, YIN Hao, ZHANG Hengchun, et al. Application status and R & D trend of horizontal directional investigation technology for long tunnel investigation [J]. Drilling Engineering, 2021,48(5):1-8.
- [4] 潘兴明,石倩,路胜杰,等.小口径近钻头地质导向仪器的研制及应用[J].钻采工艺,2018,41(1):69-71.
PAN Xingming, SHI Qian, LU Shengjie, et al. Development and application of slim-hole near-bit geosteering tool[J]. Drilling & Production Technology, 2018,41(1):69-71.
- [5] 张宁.近钻头数据无线电磁波短传输系统研究与设计[D].济南:山东大学,2017.
ZHANG Ning. Reserch and design on wireless electromagnetic short-hop transmission system of down-hole near-bit data[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [6] 张云.随钻测量数据的近钻头传输系统研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.
ZHANG Yun. The research of near-bit mwd date transmission system[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2016.
- [7] 杨志坚,齐悦,吴党辉,等.DQNBMS-1型近钻头随钻测量系统的研制与应用[J].石油钻采工艺,2013,35(1):48-50.
YANG Zhijian, QI Yue, WU Danghui, et al. Development and field application of DQNBMS-1 near-bit measurement while drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013,35(1):48-50.
- [8] 孙精明.新型近钻头随钻测量仪的研制[D].沈阳:东北石油大学,2016.
SUN Jingming. New types of near bit geological steering system [D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.
- [9] 胡斌,马鸿彦,黄秉亚,等.近钻头方位伽马随钻测量系统的研制与应用[J].石油钻采工艺,2021,43(5):613-618.
HU Bin, MA Hongyan, HUANG Bingya, et al. Development and application of near-bit azimuth gamma MWD system[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021,43(5):613-618.
- [10] 刘科满,刘修善,杨春国,等.EM-MWD系统的电磁波衰减特性[C]//中国石化石油勘探开发研究院.中国石化石油勘探开发研究院2010年博士后学术论坛.北京:2010.
LIU Keman, LIU Xiushan, YANG Chunguo, et al. Research on attenuation characteristic of electromagnetic wave based on EM-MWD [C]//Research Institute of Petroleum Exploration and Development. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC Postdoctoral Academic Forum. Beijing: 2010.
- [11] 王成立.深孔地质钻探EM-MWD样机设计及邻井接收方法研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2020.
WANG Chengli. Design of EM-MWD prototype for deep geological drilling and study of adjacent well receiving method[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2020.
- [12] 喻洪群.井下微弱信号的采集与处理技术研究[D].成都:电子科技大学,2021.

- YU Hongqun. Research on the high resolution micro-resistivity imaging logging acquisition circuit[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [13] 王家豪. 煤矿井下电磁波随钻测量系统关键技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.
- WANG Jiahao. Research on key technology of EM-MWD in underground coal mine[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.
- [14] 王岚. 随钻测量信号中继器的设计与实现[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(1): 82-83.
- WANG Lan. Application of signal relay in MWD[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(1): 82-83.
- [15] 王立双, 郑俊华, 刘鹏, 等. 电磁随钻测量中继器研制与应用[J]. 石油矿场机械, 2018, 47(5): 43-46.
- WANG Lishuang, ZHENG Junhua, LIU Peng, et al. Development and application of electromagnetic measurement repeater while drilling[J]. Oil Field Equipment, 2018, 47(5): 43-46.
- [16] 庞东晓, 韩雄, 潘登, 等. 中继传输技术在井下无线地面直读中的应用[J]. 油气井测试, 2016, 25(6): 43-45, 75.
- PANG Dongxiao, HAN Xiong, PAN Deng, et al. Application of relay transmission technology in underground wireless surface direct reading[J]. Well Testing, 2016, 25(6): 43-45, 75.
- [17] 宋继伟. ZTS系列电磁随钻测量系统小直径涡轮发电机设计研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2008.
- SONG Jiwei. Study on design of small-diameter turbine generator of zts series electromagnetic measurement while drilling system[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008.
- [18] 陈龙, 张冀冠. 煤矿井下钻孔内涡轮发电机的设计[J]. 煤矿机械, 2020, 41(5): 28-30.
- CHEN Long, ZHANG Jiguan. Design of turbine generator in coal mine borehole[J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(5): 28-30.
- [19] 刘爽. 随钻测量井下发电机涡轮的参数化设计研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- LIU Shuang. Study on the turbine parametric design for MWD downhole generator[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2017.
- [20] 沈跃, 苏义脑, 李林, 等. 井下随钻测量涡轮发电机的设计与工作特性分析[J]. 石油学报, 2008, 29(6): 907-913.
- SHEN Yue, SU Yinao, LI Lin, et al. Design of downhole turbine alternator for measurement while drilling and its performance analysis[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(6): 907-913.
- [21] 张先勇, 冯进. 井下水力涡轮的研究现状及发展[J]. 机械工程师, 2012(10): 26-29.
- ZHANG Xianyong, FENG Jin. Present research status and development of downhole hydraulic turbine[J]. Mechanical Engineer, 2012(10): 26-29.
- [22] 鄢泰宁, 吴翔, 季锋, 等. 俄罗斯电磁波随钻测量系统(MWD)及其应用前景分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007(S1): 52-57.
- YAN Taining, WU Xiang, JI Feng, et al. Russian EM-MWD and analysis of application prospects[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007(S1): 52-57.
- [23] 孙云涛, 底青云, 张文秀, 等. 基于MEMS加速度计的近钻头动态井斜测量[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(12): 134-135.
- SUN Yuntao, DI Qingyun, ZHANG Wenxiu, et al. Near-bit dynamic inclination measurement based on MEMS accelerometer[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017, 37(12): 134-135.
- [24] 燕斌. MEMS加速度传感器在矿用随钻轨迹测量系统中的误差校正[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 144-148.
- YAN Bin. Error correction of MEMS acceleration sensor used for trajectory measurement while drilling system[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(4): 144-148.
- [25] 于浩, 王璐, 胡远彪. 基于MEMS的随钻测斜精度提高方法研究[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会. 第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 北京: 地质出版社, 2019: 349-358.
- YU Hao, WANG Lu, HU Yuanbiao. MEMS based MWD accuracy improvement method [C]//Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Twentieth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conference. Beijing: Geological Publishing House, 2019: 349-358.

(编辑 李艺)