

绳索取心近钻头随钻测量系统设计与试验

朱芝同¹, 吴川^{2*}, 韦海瑞¹, 沈显鸿², 廖宇豪²

(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)

摘要:传统的随钻测量方法应用于取心钻探时, 受限于岩心管对泥浆脉冲传输通道的堵塞, 随钻仪器安装于取心钻具后方, 导致测量仪器与钻头之间存在较大距离, 造成测量的轨迹及工况数据存在滞后性, 影响钻探工艺及轨迹的精确控制。针对此问题, 提出了适用于绳索取心的近钻头随钻测量系统, 利用近钻头发射端实时采集工况及轨迹数据, 采集到的数据经甚低频电磁波发送到与取心钻具内管总成相连接的接收端进行存储, 待取心完毕打捞岩心管时将仪器提出进行数据读取。介绍了系统的整体方案及电路设计, 开展了系统短传功能的室内验证试验, 试验结果表明系统可在井下进行跨取心钻具的近钻头信息传输, 且无线短传距离可达8 m。研究成果可为近钻头随钻测量系统的相关研究提供借鉴。

关键词:绳索取心钻具; 近钻头随钻测量; 甚低频电磁波; 无线短传

中图分类号: P634.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)01-0024-07

Design of a near-bit downhole measurement system while drilling for wireline coring

ZHU Zhitong¹, WU Chuan^{2*}, WEI Hairui¹, SHEN Xianhong², LIAO Yuhao²

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. School of Mechanical and Electronic Information, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: When applied to core drilling, the traditional measurement methods while drilling are limited by the blockage of the mud pulse transmission channel by the core barrel. The measurement instrument are installed behind the core drilling assembly, resulting in a large distance between the instrument and the bit, which leads to significant lag in trajectory and operating condition data, and therefore affects the precise control of drilling process and trajectory. A near-bit measurement system while drilling for wireline coring is proposed to address this issue. The system utilizes a near-bit transmitting unit to collect operating conditions and trajectory data in real time. The collected data is transmitted via very low frequency electromagnetic waves to be stored in a receiving unit connected to the core drilling assembly's inner tube. After core extraction, the instrument is lifted along with the core barrel for data retrieval. This paper introduces the system's overall scheme and circuit design, moreover, experiments for short-range transmission function are carried out. The results demonstrate that the system can achieve near-bit information transmission across the core drilling assembly downhole, with a wireless transmission distance of up to 8m. These research findings can serve as a reference for researchers in the field of near-bit measurement system while drilling.

Key words: wireline core drilling; near-bit measurement while drilling; very low frequency electromagnetic waves; wireless short-range transmission

投稿日期: 2024-10-08; 修回日期: 2024-11-08 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.01.004

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“固体矿产高效精准勘探技术及自动化钻探装备升级与应用”(编号: DD20242850); 贵州省科技支撑计划项目“煤矿井下定向钻进轨迹动态控制技术”(编号: 黔科合支撑[2022]一般245); 自然资源部钻井工程技术创新中心课题“小口径随钻测量短节关键技术研究”(编号: PY202408)

第一作者: 朱芝同, 男, 汉族, 1986年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 从事地质钻探工艺及器具研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, zhuzt@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 吴川, 男, 汉族, 1986年生, 副教授, 博士, 主要从事随钻测量系统、井下测控系统及井下纳米发电机的研发工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, wuchuan@cug.edu.cn。

引用格式: 朱芝同, 吴川, 韦海瑞, 等. 绳索取心近钻头随钻测量系统设计与试验[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 24-30.

ZHU Zhitong, WU Chuan, WEI Hairui, et al. Design of a near-bit downhole measurement system while drilling for wireline coring[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 24-30.

0 引言

绳索取心钻探已经成为地质岩心钻探的主流技术方法,在固体矿产资源勘探过程中得到了广泛应用,它利用岩心管与绳索打捞相结合的方式,实时获取地下岩心资料^[1],从而为研究地质构造、探明矿产分布、评估开发潜能及工程地质勘察等提供重要的数据支撑^[2-4]。随着钻探深度的不断增加,钻孔轨迹变得愈加复杂^[5-6],及时获取井下参数并动态调控钻孔轨迹已成为绳索取心钻探领域研究的重点和难点内容。

传统的随钻测量普遍采用泥浆脉冲进行数据传输^[7-8]。由于取心钻具的岩心管堵塞了泥浆脉冲传输通道,随钻测量仪器只能安装于岩心管上方,导致随钻测量仪器距离钻头较远,因此所得到的轨迹及工况数据均存在较大的滞后性,无法及时调整钻探工艺参数,同时也影响井眼轨迹的控制精度。

近年来,电磁波在井下数据传输领域展现出巨大潜力,其传输速率快及受泥浆性能影响低等优点,为解决传统随钻测量技术中数据传输问题提供了新的思路。胡中志等^[9]对环空间隙内电磁波传输影响规律展开了研究,建立了电磁波传输距离的影响因素模型,为进一步的仪器研发提供了理论支撑。刘振新等^[10]将电磁波随钻测量系统应用于古林—兰陵矿区矿产勘查项目,实现了钻井参数的实时测量。

基于此,本文结合绳索取心定向钻探需求以及甚低频电磁波传输特性,设计了适用于绳索取心的近钻头随钻测量系统,克服了传统数据传输方式不适配的问题,实现了近钻头与地面的半实时单向通信,为近钻头无线短传系统的设计研究提供一种新的思路。

1 系统整体方案

图1所示为适用于绳索取心的近钻头测量系统

的整体方案,近钻头随钻测量系统主要由发射端和接收端两部分组成。发射端为中空密封舱体结构,安装于取心钻具外管总成与钻头之间。接收端为管状密封舱体结构,安装于取心钻具内管总成上端捞矛头处。发射端安装有小型化高精度的传感器,实时采集近钻头处的轨迹及工况参数,并将数据编码后以甚低频电磁波方式实时传输到接收端,接收端对接收到的数据进行解码及滤波处理,随后将数据实时存储。待取心完成后,利用捞矛将内管总成连同测量接收系统一并提出地表,从而进行数据的读取及回放,如此往复,实现半实时近钻头数据高速测量及传输。所设计的系统可实现近钻头扭矩、轴压、振动及温度等工程参数,以及方位角、工具面角及井斜角等轨迹参数的随钻测量,其信号传输距离设计为8 m。

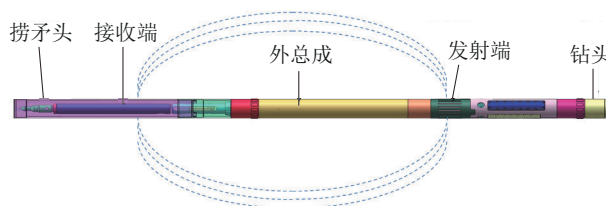


图1 系统整体方案示意

Fig.1 The overall scheme diagram of the system

2 系统设计

2.1 总体电路设计

在实际取心作业中,由于钻具所在的井下环境恶劣,对信号发射和接收电路的稳定性与可靠性提出了较高的要求。为保证近钻头随钻测量系统的正常工作,设计时必须优选满足井下温度及振动需求的电子元器件,同时还需简化电路,以提升可靠性。近钻头随钻测量系统信号传输流程如图2所示。

2.2 信号调制与解调

通信系统中原始信号能量较低,不适合直接传

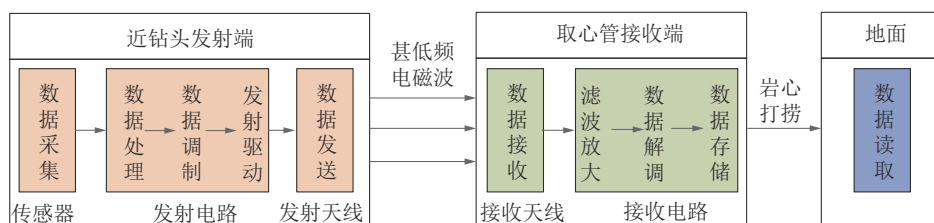


图2 信号传输流程

Fig.2 Flow diagram for signal transmission

输,一般将原始电信号加载到高能量的载波信号上,这个过程称为调制^[11]。调制可以使得数据信息以适当的频率在信道中更有效地传输。本文采用二进制频移键控(2FSK)调制方式进行信号的调制,2FSK信号可以看成是频率分别为 f_1 和 f_2 的两个余弦信号的合成,2FSK信号可表示为:

$$S(t) = A \cos(2\pi f_1 t + \varphi) + A \cos(2\pi f_2 t + \varphi) \quad (1)$$

式中: A ——幅值; φ ——相位; f_1 ——第1个余弦信号频率; f_2 ——第2个余弦信号频率; t ——时间。

保持余弦波的幅值 A 以及相位 φ 为常量,利用余弦波的频率来传递基带数字信号。假设余弦波频率与基带信号的表征关系如表1所示,其中利用频率为 f_1 的余弦波来表征基带信号“1”,用频率为 f_2 的余弦波来表征基带信号“0”。

表1 正弦波与基带信号表征关系

Table 1 The relationship between sine wave and baseband signal characterization

载波信号	f/kHz	基带信号
$A \cos(2\pi f_1 t + \varphi)$	10	1
$A \cos(2\pi f_2 t + \varphi)$	40	0

FSK信号的解调方法分为相干解调和非相干解调两大类^[12],其中相干解调法抗干扰能力强^[13],在信噪比高的井下环境信道中是一个优良的选择,但由于需要在接收端生成相干载波,在电路上实现比较复杂,且输出结果受提取精确度影响较大,因此不采用此方法。非相干解调不需要本地相干载波^[14],电路简单且锁相环技术性能稳定、便于集成,适合井下通信环境,因此本系统选用锁相环进行FSK信号的解调。

锁相环解调法原理如图3所示。锁相环为负反馈系统,其中锁相环芯片的主要构成包括鉴相器(PD)、低通滤波器(LPF)以及压控振荡器(VCO)。鉴相器为正弦特征相位检测器,其输出 $u_d(t)$ 与相位差成正比,用于对比输入信号和压控振荡器输出,获得相位差。通过低通滤波器可有效清除相位检测器输出中的高频干扰与噪声,确保锁相环路稳定性。随后从 $u_i(t)$ 中提取低频成分或直流分量作为压控振荡器的输入控制电压。压控振荡器的输出频率与低通滤波器的输出电压成正比。系统通过不断调整振荡器的输出频率,直至与参考信号频率

相匹配,实现捕获过程,确保两者的相位保持一致,达到锁相的目标。

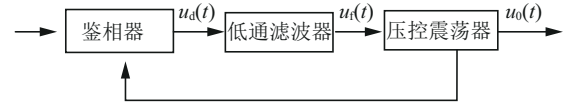


图3 锁相环解调法原理

Fig.3 Principle block diagram of phase-locked loop demodulation method

当接收信号与压控振荡器的初始振荡信号存在相差,将鉴相器输出的相差信号微分后,得到反映两者信号之间的频差信号,此频差信号经环路滤波器平滑处理后,控制压控振荡器的振荡频率向输入信号频率靠近,最终使二者频率相等从而实现解调过程。

设输入信号:

$$S(t) = A \sin[\omega_i t + \theta_i(t)] \quad (2)$$

式中: ω_i ——输入信号角频率; $\theta_i(t)$ ——随时间变化的相位偏移。

压控振荡器输入信号:

$$u_0(t) = 2\cos(\omega_v t + \theta_0) \quad (3)$$

式中: ω_v ——振荡器输入信号角频率; θ_0 ——初始相位。

则有:

$$u_i(t) = A^2 \left[\Delta\omega + \frac{d\theta_i(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

式中: $\Delta\omega$ ——输入信号角频率和振荡器输入信号角频率差值; $u_i(t)$ ——低通滤波器输入信号

当输入信号为单载波信号时,可得:

$$u_i(t) = A^2 \Delta\omega \quad (5)$$

上式反映了输入信号和压控振荡器输出信号的频差。对于FSK信号来讲,上式即为调制信号,对其进行滤波判决,即可完成FSK信号的解调。

2.3 信号放大与滤波

未经功率放大的信号通常较弱,无法在较长的距离上传输。因此信号调制后需将mV级别的信号进行放大后再发射,以便增加信号传输距离。本系统使用两级功放电路,先使用初步功放电路对mV级的正弦信号进行电压放大,再通过二级功放电路对信号进行电流放大,经过二次放大的信号能够直接驱动发射天线的负载线圈。

信号在传输过程中由于地层的阻隔衰减严重,

且夹杂大量噪声,因此需要对信号进行滤波处理。带通滤波器选定为巴特沃斯滤波器,使用两个二阶巴特沃斯滤波器组成四阶带通滤波器。巴特沃斯滤波器的特点是通频带内的频率响应曲线最大限度平坦,没有起伏,而在阻频带则逐渐下降为零^[15-16]。该带通滤波器的中心频率为 25 kHz,带通宽度 20 kHz,带阻宽度 200 kHz。如图 4 所示为该带通滤波器阶跃响应曲线。

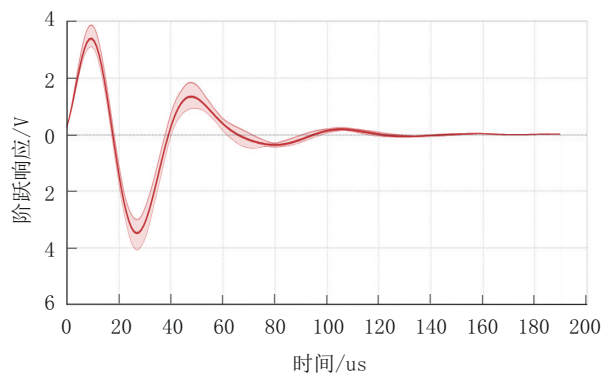


图 4 带通滤波器阶跃响应

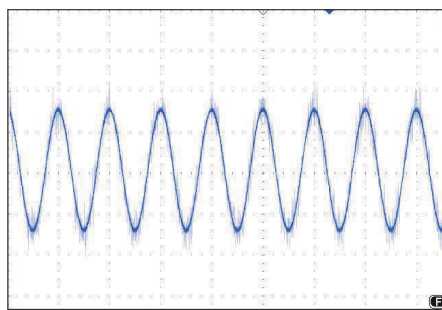
Fig.4 Step response of the band-pass filter

3 试验验证

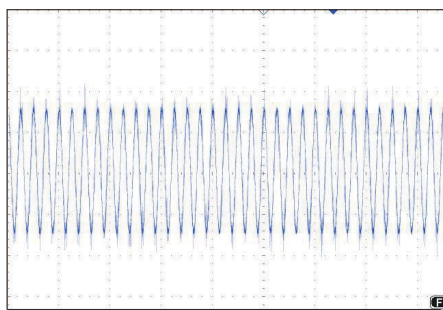
3.1 发射信号测试

近钻头随钻测量系统发射性能是验证整体性能的基础,因此需对发射信号进行测试。通过软件程序设定输出频率为 10、40 kHz 的正弦波、以及 10~40 kHz 的 FSK 信号,程序设定输出幅度(幅度为峰峰值)为 830 mV,采用示波器测量得到的输出波

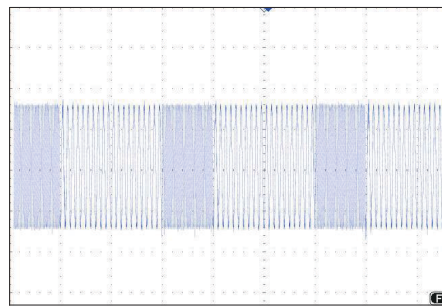
形如图 5 所示。根据输出的波形可以看出波形的幅值约 830 mV,各个波形的频率也符合设定值,FSK 信号稳定且清晰,同时输出的波形无明显突出毛刺,因此信号发送电路模块达到预期的设计目标。



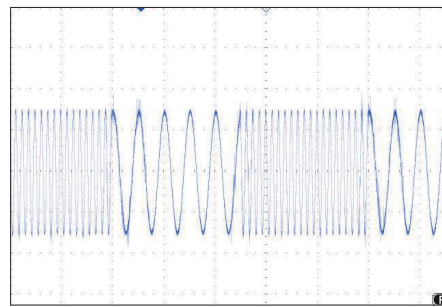
(a) 10kHz 的正弦交流信号



(b) 40kHz 的正弦交流信号



(c) 10~40kHz 的 FSK 信号(时段一)



(d) 10~40kHz 的 FSK 信号(时段二)

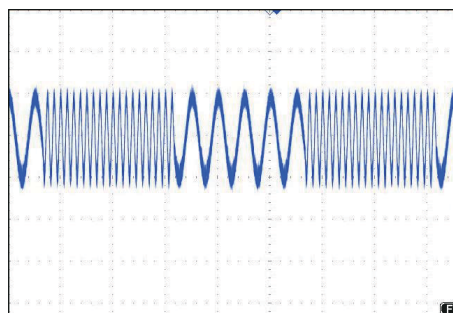
图 5 发射信号输出波形

Fig.5 Output waveform of transmitted signal

3.2 功放电路测试

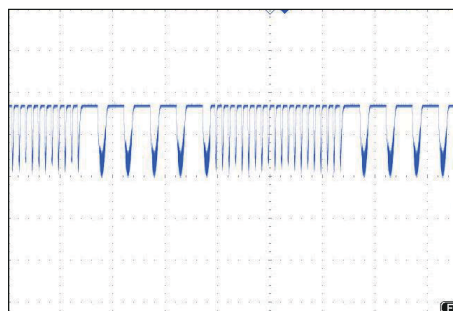
初级功率放大器为可调电压放大器,通过旋转可调电阻来实现放大倍数的调节。在输入信号的

电压为 800 mV 时,可实现输出信号电压 2~5 V 的无级调节。在供电电压一定的情况下,当放大倍数过高时会出现削峰现象。测试结果如图 6 所示。



峰值 5.04V 频率 10.73kHz 占空比 55.45%
最小值 4.64V 最大值 9.68V

(a) 最佳输出波形



峰值 1.76V 频率 40.00kHz 占空比 75.40%
最小值 720mV 最大值 2.48V

(b) 削峰现象波形

图6 功放电路输出信号

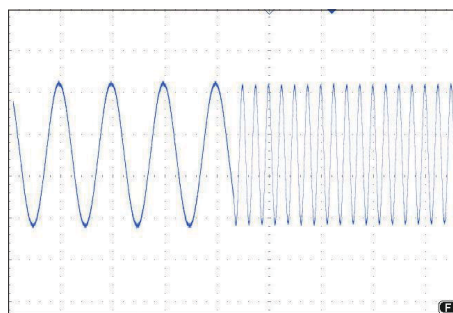
Fig.6 Output signal of power amplifier circuit

从测试结果看,初级功率放大器放大倍数符合预定设计目标。在调整合适的情况下,输出信号的峰值最高能达到5.04 V,信号稳定无变形且无明显毛刺,但信号中夹杂高频噪声。

二级功率放大电路的性能直接关系到整个发射系统的信号强度,因此需对其信号输出波形及输出电流进行测试。二级功放模块直接由锂电池供电,模块的最大供电幅值电压达到28 V。测试时输出幅度值为830 mV的正弦波信号作为初始信号,初始信号经过一级功放抬高输出信号幅值电压到5.04 V后,再接入二级功率放大器进行电流放大,提升系统的负载能力。此时二级功放输出信号幅度值为17.4 V。将电流表与负载串接在输出电路中,测得携带负载线圈的情况下的输出电流为160 mA,输出信号的波形图如图7所示。

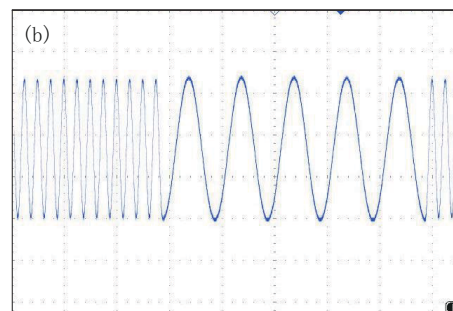
3.3 接收信号测试

接收端系统主要测试其能否过滤环境中的噪声。通过设置输入频率10~40 kHz的FSK正弦信号进行测试验证。为验证解码正确性,在发射端重



峰值 17.6V 频率 10.02kHz 占空比 49.92%
最小值 -8.40V 最大值 9.20V

(a) 10kHz初始信号接入负载输出波形



峰值 17.4V 频率 40.00kHz 占空比 50.08%
最小值 -7.60V 最大值 9.80V

(b) 40kHz初始信号接入负载输出波形

图7 接入负载输出波形

Fig.7 Access load output waveform diagram

复发送“11101010”的八位二进制基带信号,对基带信号FSK调制,其中“1”对应高频40 kHz的正弦交流信号,“0”对应低频10 kHz的正弦交流信号。调制后的信号经过功率放大由发射天线线圈进行发射,接收线圈与发射线圈的距离为8 m,用示波器分别测量发射线圈、接收线圈两端输出的信号波形进行对比,所得结果如图8所示。

接收信号波形表明当传输距离为8 m时,接收到的初始信号已夹杂大量噪声干扰信号。当通过放大电路与带通滤波器之后,FSK信号已经基本还原,但由于带通滤波对不同频率信号的增益不同,导致高频分量与低频分量产生了幅值差。最后经过FSK解调芯片后,信号被还原成代表“1”的高电平与代表“0”的低电平。由此证明了设计的接收端能够完成预定的设计目标,将接收到的信号还原成基带信号。

3.4 井下通信试验

实物组装完成后(如图9所示),搭建了室内模拟环境,将发射端和接收端浸泡在装满水的环境中

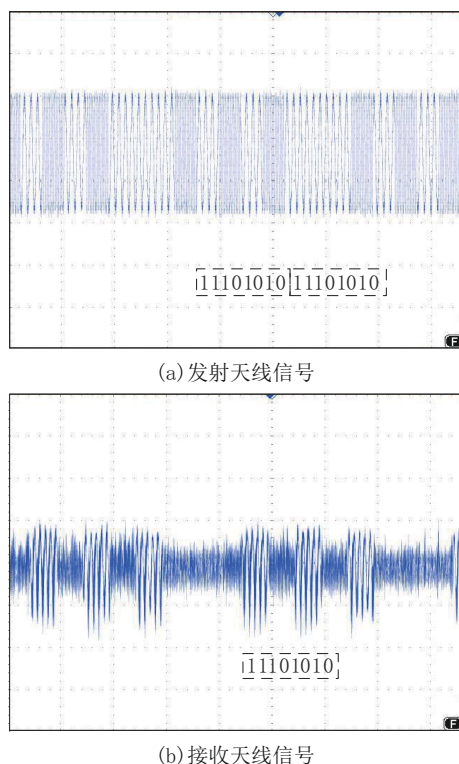


图8 信号传输过程波形

Fig.8 Waveform during the signal transmission process

以模拟泥浆环境,通过人为移动发射端及接收端的距离来改变信号传输距离。试验的目的主要是验证信号传输距离及编解码功能,因此试验时仅以采集到的温度数据为例进行井下通信试验(所测量工程参数中的振动频率、扭矩、钻压及轨迹参数中的方位角、工具面角及井斜角不再一一列举)。将传感器采样的一组数据设置为2个字节,即16位数据,设定载波信号的频率为10 kHz与40 kHz,基带信号为1000 bit/s,由此计算出发送一组数据的时间为0.016 s。通过发射端主控程序设定发送每组数据的时间间隔为1 s。为降低误码对数据的干扰,每组数据发送3次,取交集数据,试验结果如图10所示。

读取的温度数据平均值为16.9℃,水温为17.0℃,测量误差在+0.2~-0.2℃之间,符合温度传感器正常误差范围,由此证明在8 m的传输距离内,所研发的绳索取心近钻头随钻测量系统能够满足数据实时采集及无线传输的需求。

4 结论

本文提出了一种绳索取心近钻头随钻测量系统,克服了传统随钻测量方法采集数据滞后性问

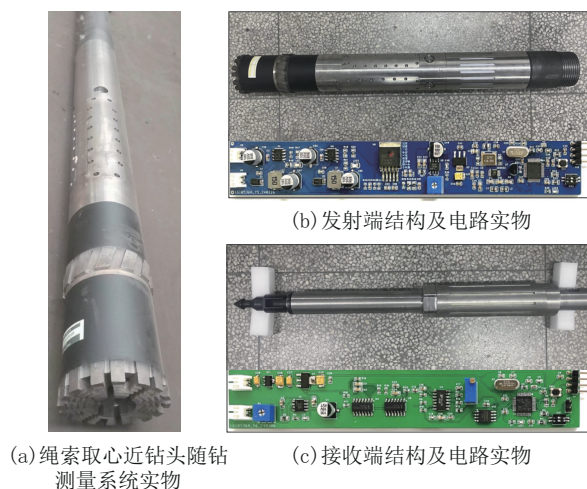


图9 绳索取心近钻头随钻测量系统实物

Fig.9 Picture of near-bit measurement while drilling system for wire-line coring

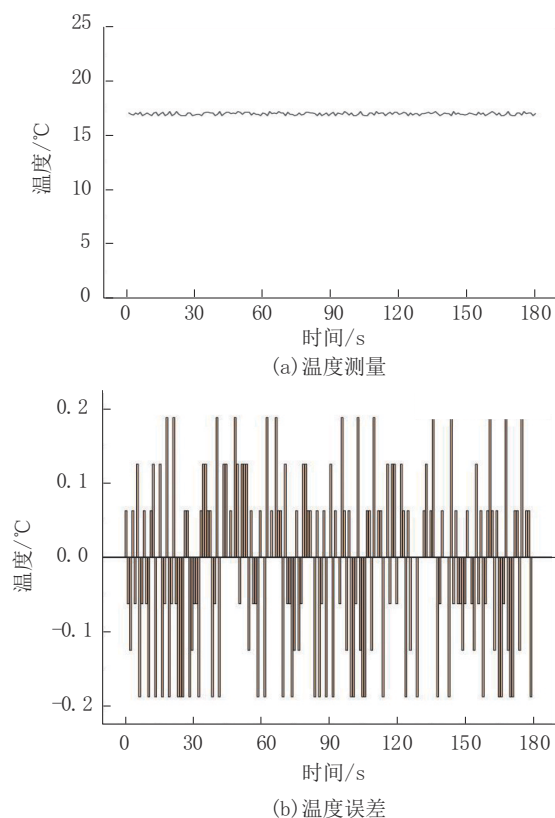


图10 试验结果

Fig.10 Experiment results

题,实现了近钻头与地面的半实时单向通信。通过室内模拟环境下的井下通信试验,验证了该系统能够在8 m的传输距离内稳定可靠地实现数据的传输,满足近钻头数据实时采集及无线传输的需求,为绳索取心钻探工艺随钻测量系统的研究提供了

新的思路。

未来将从两个方面继续开展研究:(1)目前的传输距离为地表试验下的最远传输距离,当距离超过8 m后将会产生较多误码,因此未来将对解码的硬件电路进行优化,同时也考虑加入纠错码软件优化算法,以进一步提升信号传输距离;(2)目前研发所用电子器件均不耐高温环境,若应用于超深井及地热井时,井下的工况温度将超过电路的承受温度,因此未来将优选耐高温的传感器及电子器件,并结合高温合金材料、散热涂层和微型散热器等复合手段,以进一步提高耐温范围,拓展在高温井下环境的应用。

参考文献(References):

- [1] 陈岳,张杰丰,董凯飞,等.大口径绳索取心钻探技术在煤层气参数井勘探中的应用[J].地质装备,2024,25(4):28-33.
CHEN Yue, ZHANG Jiefeng, DONG Kaifei, et al. Application of large-diameter wireline core drilling technology in the exploration of coalbed methane parameter well[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2024,25(4):28-33.
- [2] 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.
- [3] 何蕙岚,王久全,李秋玥,等.直连绳索取心钻杆分区热处理技术研究[J].钻探工程,2024,51(3):125-130.
HE Huilan, WANG Jiuquan, LI Qiuyue, et al. Research on zone heat treatment technology of straight-connected wire-line core drill pipe[J]. Drilling Engineering, 2024,51(3):125-130.
- [4] 徐世毅,王胜,舒智宏,等.全地层自适应绳索取心钻具割心机构优化[J].钻探工程,2023,50(S1):392-398.
XU Shiye, WANG Sheng, SHU Zhihong, et al. Optimization of core cutting mechanism of all-strata self-adaptive wire-line core drilling tool[J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):392-398.
- [5] 王红.复杂地层煤炭资源勘查绳索取心钻探技术应用与绿色勘查实践研究[J].西部探矿工程,2023,35(9):37-41.
WANG Hong. Rope coring drilling technology for coal resources exploration in complex strata[J]. West-China Exploration Engineering, 2023,35(9):37-41.
- [6] 武治强,幸雪松,庞照宇,等.超深井长裸眼段岩屑运移规律及特征分析[J].科学技术与工程,2023,23(11):4596-4606.
WU Zhiqiang, XING Xuesong, PANG Zhaoyu, et al. Analysis of cuttings transport law and characteristics in long open hole section of ultra-deep well[J]. Science Technology and Engineering, 2023,23(11):4596-4606.
- [7] 王居贺,孙伟光,于东兵.超深井连续管短半径侧钻工艺研究与现场试验[J].石油机械,2023,51(1):33-39.
WANG Juhe, SUN Weiguang, YU Dongbing. Research and field testing of CT Short-Radius sidetracking technology for ultra-deep wells[J]. China Petroleum Machinery, 2023,51(1):33-39.
- [8] 宋山,赵小勇,付华才,等.随钻测井数据有损压缩算法改进探讨与应用[J].钻采工艺,2023,46(6):170-176.
SONG Shan, ZHAO Xiaoyong, FU Huacai, et al. Improvement and application of lossy compression algorithm for LWD data[J]. Drilling & Production Technology, 2023,46(6):170-176.
- [9] 胡中志,王佩赛.套管一钻杆窄间隙环形空间电磁波传输特性[J].天然气工业,2024,44(8):114-124.
HU Zhongzhi, WANG Peisai. Electromagnetic wave transmission characteristics in narrow casing-drill pipe annulus[J]. Natural Gas Industry, 2024,44(8):114-124.
- [10] 刘振新,孙宏晶,杨怀俊,等.电磁波随钻测量系统在兰陵铁矿钻探工程中的应用[J].地质装备,2024,25(S1):168-175.
LIU Zhenxin, SUN Hongjing, YANG Huaijun, et al. Application of electromagnetic measurement while drilling system in the drilling project of Lanling Iron ore mine[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2024,25(S1):168-175.
- [11] 曲汉武,尚捷,卢华涛,等.摆动阀式泥浆脉冲器电机输出特性及影响因素分析[J].煤田地质与勘探,2023,51(9):180-188.
QU Hanwu, SHANG Jie, LU Huatao, et al. Analysis on motor output characteristics and influencing factors of oscillating valve mud pulser[J]. Coal Geology & Exploration, 2023,51(9):180-188.
- [12] 张柏林,姬港,朱宇轩,等.基于深度学习的半监督信号调制样式识别算法[J].电子科技大学学报,2024,53(4):511-518.
ZHANG Bailin, JI Gang, ZHU Yuxuan, et al. A Semi-supervised signal modulation mode recognition algorithm based on deep learning[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2024,53(4):511-518.
- [13] 张夏瑜,张佳浩,焦杰,等.面向新型声波激励超低频天线的2FSK通信系统解调算法[J].水下无人系统学报,2024,32(4):621-627.
ZHANG Xiayu, ZHANG Jiahao, JIAO Jie, et al. 2FSK communication system demodulation algorithm for novel acoustically excited SLF antennas[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2024,32(4):621-627.
- [14] 令璐璐,王辅忠,信雅芯,等. Levy噪声驱动下基于三稳态随机共振理论降低2FSK信号误码率的研究[J].应用力学学报,2021,38(6):2224-2229.
LING Lulu, WANG Fuzhong, XIN Yaxin, et al. Reduction of bit error rate of 2FSK signal driven by Levy noise based on tristable stochastic resonance theory[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021,38(6):2224-2229.
- [15] 田鸿昌,朱权喆,郑国栋.基于频移键控的无线电能与数据共同传输方法[J].电子技术应用,2023,49(5):115-118.
TIAN Hongchang, ZHU Quanzhe, ZHENG Guodong. Wireless power and data transfer method based on frequency shift keying[J]. Application of Electronic Technique, 2023,49(5):115-118.
- [16] 王柏森,卢艳军,张晓东,等.基于巴特沃斯低通滤波器的自适应步长梯度下降姿态解算方法[J].探测与控制学报,2023,45(3):116-120,125.
WANG Baisen, LU Yanjun, ZHANG Xiaodong, et al. Adaptive step gradient descent attitude algorithm of LPB[J]. Journal of Detection & Control, 2023,45(3):116-120,125.

(编辑 王文)