

井下通信线圈的谐振频率自适应检测技术研究

左国勇

(中石化石油机械股份有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 常规旋转导向的井下无线短传是磁耦合式定频传输的, 存在通信线圈的谐振频率随环境变化的现象, 容易导致接收信号强度随钻进过程浮动, 严重时可能收不到信号, 甚至造成乱码。本文提出了基于自动窗口算法自适应检测井下通信线圈谐振频率的技术, 先从井下通信线圈谐振频率自检原理入手; 然后对比4种自适应选频算法, 确定自动窗口算法是更合理的自适应选频算法; 最后采用自适应选频和扫频2种方法, 对定制的两批井下线圈进行谐振频率检测, 论证了自动窗口选频技术的可靠性。该技术能够自动适应井下环境, 为井下无线短传提供可靠的谐振频率参数。井下旋转变压器的电能传输效率与谐振频率密切相关, 该技术也可推广至井下旋转变压器的变形设计, 优化钻进过程的电能传输效率。

关键词: 自适应选频; 井下无线短传; 自动窗口; 磁场耦合线圈; 谐振频率; 井下旋转变压器; 旋转导向

中图分类号: P634; TE242 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)02-0120-08

Research on adaptive detection technology of resonance frequency of downhole communication coil

ZUO Guoyong

(SINOPEC Oilfield Equipment Corporation, Wuhan Hubei 430040, China)

Abstract: Conventional rotary steerable downhole wireless short transmission is magnetically coupled fixed frequency transmission. The resonant frequency of the communication coil changes with the environment, which easily leading the received signal strength floating with the drilling process, and may not be received in severe cases, and even cause garbled code. In this paper, an adaptive detection technology of downhole communication coil resonance frequency based on automatic window algorithm is proposed. It starts with the introduction of the self-detection principle of downhole communication coil resonance frequency. Then compared with four kinds of adaptive frequency selection algorithms, the automatic window algorithm is determined to be the more reasonable adaptive frequency selection algorithm. Finally, adaptive frequency selection and frequency-sweep method are used to detect the resonant frequency of two batches of customized downhole coils, in order to demonstrate the reliability of automatic window frequency selection technology. This technology can automatically adapt to the downhole environment and provide reliable resonant frequency parameters for downhole wireless short transmission. As the power transmission efficiency of downhole rotary transformer is closely related to the resonant frequency, this technology can also be extended to the deformation design of downhole rotary transformer to optimize the power transmission efficiency during drilling.

Key words: adaptive frequency selection; downhole wireless short transmission; automatic window; magnetic coupling coil; resonant frequency; downhole rotary transformer; rotary steerable system

0 引言

随钻测井技术具有信息采集准确和容易施工

的优点, 一方面减少了测井过程中成本的浪费, 另一方面大概率避免井漏、井塌和卡钻等钻井事故的

收稿日期: 2022-10-09; 修回日期: 2022-12-02 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.02.017

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“基于中继站的电磁随钻测量井底数据传输机理与实验研究”(编号: 41572355)

作者简介: 左国勇, 男, 汉族, 1990年生, 助理研究员, 地质工程专业, 博士, 从事井下通信和设备故障诊断工作, 湖北省武汉市东西湖区泾河街道金山大道72号, 276360231@qq.com。

引用格式: 左国勇. 井下通信线圈的谐振频率自适应检测技术研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(2): 120-127.

ZUO Guoyong. Research on adaptive detection technology of resonance frequency of downhole communication coil[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 120-127.

发生^[1-5]。常用的井下测量短节有方位伽马和随钻电磁波电阻率^[6-11],但测量短节一般距离钻头较远,在横向起伏较大或有断层的地层使用时,经常出现仪器识别出层界面时,钻头早已出目的层的现象。鉴于上述原因,近钻头测量越来越受到测井的欢迎^[9,11-16]。利用近钻头随钻测井技术,可以实时获取近钻头前方岩性变化和底层压力等信息,对于优化钻井参数和钻井液性能具有指导意义。

近钻头随钻测井数据传输至地面一般需要经历两个过程:近钻头仪器至泥浆脉冲的井下无线短传和泥浆脉冲至地面的井下无线长传。在近钻头仪器和泥浆脉冲之间存在螺杆钻具,不便于过电缆,所以一般采用井下无线短传的方式。目前井下无线短传主要有两种技术实现方式,分别是声波短传和电磁波短传。

声波短传方式主要以钻柱作为传输介质,钻井液和地层电阻不会影响声波的传输^[17-20]。但是因为传播的多路径导致到达接收端的声波出现多径现象,同时螺杆和钻头的转动都会产生一定的环境噪声,影响信号接收的有效性,严重时甚至会中断信号的接收。

电磁波短传是直接将近钻头传感器采集的数据通过磁场耦合的电磁波传输至泥浆脉冲,其主要优点是抗井下噪声能力强、信号频带宽和功率相对较低^[21-22];其缺点是通信距离不能过大。因为是短距离传输,系统的通信速率可以维持在一个较高的水平。

常规旋转导向的井下无线短传是磁耦合式定频传输的,存在的问题是:当地层或泥浆等环境介质^[23-24]改变后,接收线圈的固有谐振频率随之改变,而发射信号的频率是固定的,导致接收信号的强度会变弱,严重时可能收不到信号,甚至造成乱码。从通信的角度解决问题的办法有3个:一是增大发射功率,但发射端一般用的是电池供电,所提供的功率有限。二是改善信道,但信道由井下动力工具、泥浆和地层等构成,无法改变。三是自适应选频,该技术可以保证井下无线短传系统始终工作在谐振频率附近,使系统可靠性更高。

井下无线短传自适应谐振频率技术,国内外鲜有资料可借鉴,仅在一篇专利和一则行业资讯上看到。2020年华中科技大学申请的专利“一种双谐振型近钻头信号短传系统”(专利号:202010448433.9)

使用的是自适应选频原理^[25],但其专利采用的自适应选频算法是扫频式的,在宽频范围和频率精度高的要求下,算法具有较大的缺陷。2021年2月油媒方上公布的CGDS近钻头地质导向系统下一步的工作重点之一是自适应无线短传技术的研发。总体来说,井下自适应选频技术的开发与应用仍属于探索阶段,是智能钻井的前沿技术之一。针对现有的无线短传中存在的问题,本文提出基于自动窗口算法的自适应选频技术。先对通信线圈谐振频率自检理论进行仿真分析和电路实测,验证其准确性;再通过4种选频算法的对比,确定以自动窗口算法是更合理的自适应选频算法;最后在自检理论和选频算法的基础上,开发了一套具有自主知识产权的基于自动窗口算法的自适应选频技术,并进行了验证。

1 谐振频率自检原理

线圈的等效电路为一个电阻串联一个电感后再整体并联一个电容,如图1所示。线圈谐振频率自检的原理是:线圈接入信号源和外接电阻后可构成并联谐振电路的形式;当信号源的频率为线圈的谐振频率时,线圈处于谐振状态,线圈等效电路的阻抗最大;外接电阻是定值的,因此电路的总阻抗也最大,总电流最小,外接电阻的电压也最小;可以通过检测某个频率信号对应的外接电阻电压最小,来判断线圈的谐振频率。根据线圈谐振频率自检的原理,设计如图2所示的仿真测试电路。该仿真测试电路的目的是检测外接电阻电压变化能否确定线圈的谐振频率。

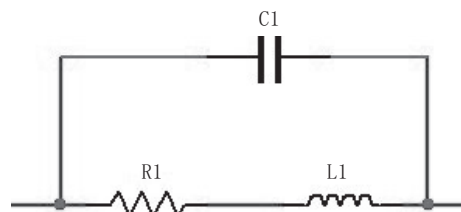


图1 线圈等效电路

Fig.1 Coil equivalent circuit

当线圈处于谐振状态时,线圈的阻抗基本不变;如果增大外接电阻的阻值,信号输入电压保持不变,根据串联分压原理可知,外接电阻的电压也会越大。改变外接电阻 R_2 的阻值,谐振时的波特值及其频率如表1所示。外接电阻 R_2 从1~50 Ω 逐渐增大

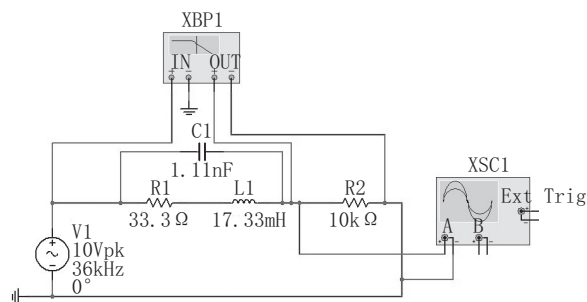


图2 线圈谐振频率自检仿真测试

Fig.2 Coil resonant frequency self-detection simulation test

时,谐振对应的波特值在逐渐增大,但对应的谐振频率基本不变。这个现象说明:外接电阻的大小对谐振频率无影响;外接电阻越大,其电压幅值 U_0 与信号的电压幅值 U_1 之比也越大。

表1 不同外接电阻 R_2 对应的最小波特值及其频率Table 1 The minimum baud value and its frequency of different external resistances R_2

电阻 R_2/Ω	最小波特值/dB	对应的频率/kHz
1	-102.5	41.4
10	-82.2	41.2
20	-76.2	41.2
30	-72.8	41.3
40	-70.2	41.2
50	-68.4	41.3

上述自检是仿真分析的结果,还需要搭建电路进行实测。根据图1所示的自检原理图搭建实测电路,信号源采用信号发生器生成幅值为10 V的正弦信号,实测线圈采用上述接收线圈。改变外接电阻阻值,记录不同频率下的外接电阻的电压幅值,如图3所示。由图3中实测的3种情况可以发现:外接电阻不影响谐振频率;信号的电压幅值一定时,外接电阻越大,外接电阻的电压幅值也越大。对比仿真分析和实测结果,说明谐振频率自检原理是可行的。

过大的电阻,会使输出电压与输入电压差别不大,导致识别谐振频率信号比较困难。为便于识别外接电阻的电压变化过程,推荐外接电阻的电压幅值与信号的电压幅值之比 <0.5 ,在波特图上的波特值应小于 -6 dB。

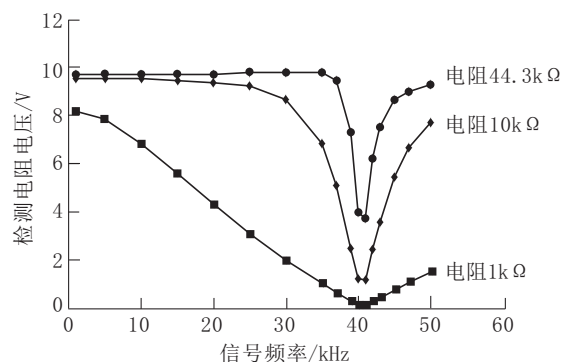


图3 不同外接电阻的电压幅值随频率的变化曲线

Fig.3 Curves of voltage amplitude of different external resistors varies with frequency

2 自适应选频算法分析

根据井下线圈谐振频率自检理论,设计的自适应选频技术流程如图4所示。选频启动时,通过信号参数控制模块,预先给定正弦信号的参数;通过DDS芯片、信号偏置电路和功率放大电路等,输出幅值恒定、频率随控制参数变化的正弦信号;不同频率的正弦信号接入井下线圈和外接检测电路后,输出对应幅值的直流信号;直流信号再经过AD转换后,输出对应的数字信号;自适应选频算法再对一系列数字信号进行处理,达到选频精度后输出优选频率,否则反馈输出相应的信号参数进行下一轮选频。

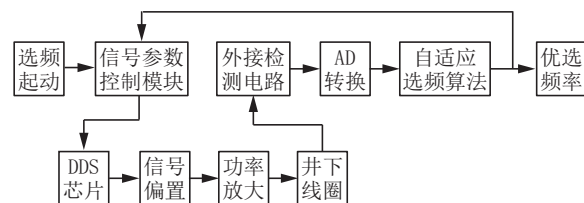


图4 自适应选频技术流程

Fig.4 Process of adaptive frequency selection technology

自适应选频技术的核心是自适应选频算法,自适应选频算法关系到井下线圈谐振频率检测的准确性、精度和快慢。因此,设计了4种自适应选频算法,分别是二分迭代算法、五点迭代算法、滑动窗口算法和自动窗口算法。

二分迭代算法的原理是:迭代初始,在选频范围内,任取两个频率点,比较该两个频率点对应的函数输出大小,以较小的函数输出频率点为中心频率,缩小步长,生成两个新的频率点,再比较新的两个频率点对应的函数输出大小,依次迭代至选频精度范围

下对应的中心频率,该中心频率即为优选频率。

五点迭代算法的原理是:迭代初始,在选频范围内,均匀取5个频率点,比较该5个频率点对应的函数输出大小,以最小的函数输出频率点为中心频率,其左右相邻的两个频率点为起始和终止频率点,缩小步长,均匀插入2个新的频率点,构成5个新的频率点,再比较新的5个频率点对应的函数输出大小,依次迭代至选频精度范围下对应的中心频率,该中心频率即为优选频率。

滑动窗口算法的原理是:迭代初始,先将选频范围均匀分为多个小范围,对每个小范围内采用二分迭代算法优选出相应的频率点;再比较每个小范围内的优先频率点的函数输出大小,选择函数输出最小时对应的频率点为全范围内最优的频率点。

自动窗口算法的原理是:迭代初始,先将选频范围均匀分为多个频率点,比较每个频率点对应的函数输出大小,以最小函数输出对应的频率点的左右相邻频率点为新的选频范围,在新的选频范围内均分多个新的频率点,比较每个新频率点对应的函数输出大小,依次迭代至选频范围不大于选频精度,最终函数输出最小的频率点为优选频率。

根据上述4种自适应选频算法的原理,分别编写对应的自适应选频程序。再设计相应的测试函

数,分别检测该4种算法的选频性能,如表2所示。综合对比可以确定,自动窗口算法是更合理的自适应选频算法。

表2 自适应选频算法性能对比

Table 2 Performance comparison of adaptive frequency selection algorithm

自适应选频算法	选频准确性	选频快慢	选频分辨率
二分迭代	一般	较快	一般
滑动窗口	较高	较慢	较高
五点迭代	一般	一般	一般
自动窗口	较高	一般	较高

以测试函数 $y=(x-40)^2+500\sin(0.2\pi x)$ 为例,在定义域范围 $[1,50]$ 内有多个极小值点,且最小值点为 $(37.5, -493.8)$ 。为验证基于自动窗口的自适应选频算法是否能够实现其功能,根据算法原理编写程序进行测试。图5是基于测试函数编写程序进行测试后的关键参数,定义域范围依旧是 $[1,50]$,迭代次数为3,自适应选频的结果是37.5。自适应选频的结果与该测试函数的极小值点完全一致,说明基于自动窗口的自适应选频算法在选频范围内存在多个极值点的情况下,依然能够实现自适应选频的功能。

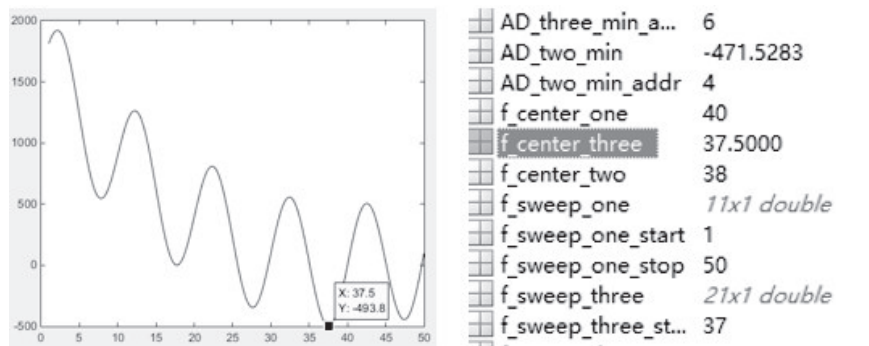


图5 测试函数

Fig.5 Test function

为验证基于自动窗口自适应选频算法的边沿检测能力,设计测试函数1为 $y=(x+50)^2+500\sin(0.2\pi x)$ 和测试函数2为 $y=(x-60)^2+500\sin(0.2\pi x)$,其波形分别如图6左侧和图7左侧所示。测试函数1和测试函数2的选频范围仍为 $[1,50]$,选频精度为0.1,测试函数1的最小值点为 $(6.9, 2773)$,测试函数2的最小值点为 $(47.6, -345.3)$ 。

图6右侧参数为测试函数1的选频参数,优选频率点为6.9,与图6左侧理论设计的完全一致;图7右侧为测试函数2的选频参数,优选频率点为47.6,与图7左侧理论设计的完全一致。综合上述可以说明:在多级值点的波形中,基于自动窗口的自适应选频算法的边沿检测依旧是正确的。

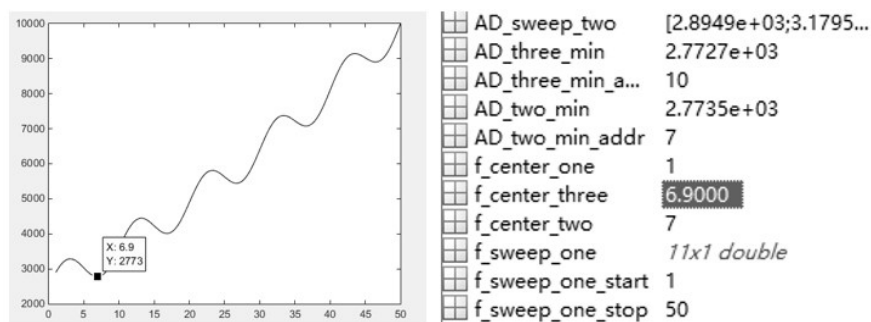


图6 最小值点在选择频范围左边沿

Fig.6 The minimum point is on the left edge of the frequency range

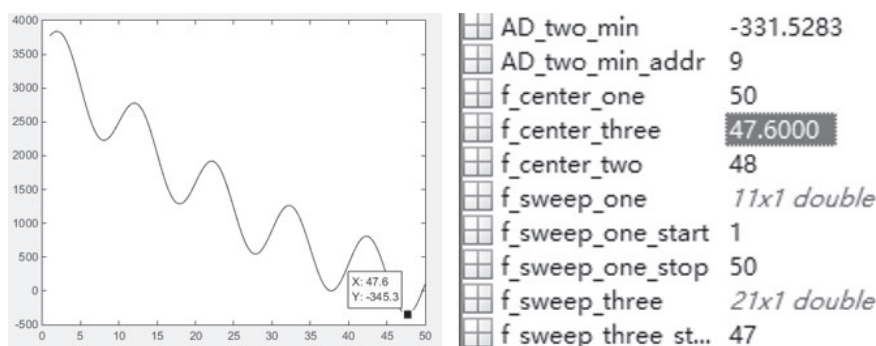


图7 最小值点在选择频范围右边沿

Fig.7 The minimum point is on the right edge of the frequency range

3 自适应选频技术仿真

自动窗口选频硬件包含 AD9833 模块、选频偏置放大模块、AD637 模块、AD 转换模块、FPGA 核心板模块和电源模块等 6 个部分,如图 8 所示。图 8

中 $\pm 12\text{ V}$ 、 5 V 和 GND 接电源模块, SDATA、SCLK、FSYNC、ADC_CN_N、ADC_SCLK、ADC_DIN 和 ADC_DOUT 等接 FPGA 核心板模块。

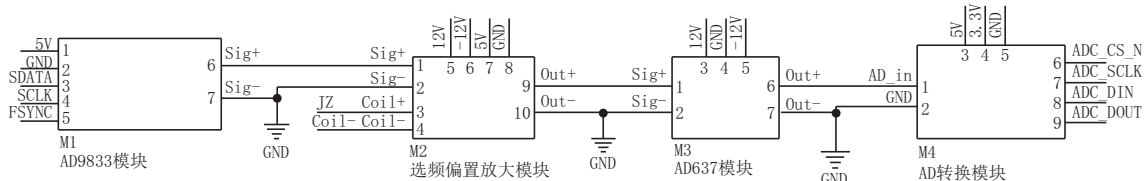


图8 自动窗口选频硬件组成

Fig.8 Automatic window frequency selection hardware composition

将自动窗口选频模块例化至对应的 testbench 文件,仿真的输入参数有:仿真的选频范围是 $1\sim 50\text{ kHz}$,第一次选频的频率布点是 $1、5、10、15、20、25、30、35、40、45$ 和 50 kHz ,对应的 AD 值分别是 $550、650、750、850、95、1050、1150、1250、1350、1450$ 和 1550 ;第二次选频的频率布点是 $15、16、17、18、19、20、21、22、23、24$ 和 25 kHz ,对应的 AD 值分别是 $550、650、750、850、95、1050、1150、1250、1350、1450$

和 1550 ,如图 9 所示。根据自动窗口选频原理可知,需要找到最小 AD 值对应的频率。在图 9 中可发现,第一次选频在频率点为 20 kHz 对应的 AD 值最小,新的选频范围即为 $15\sim 25\text{ kHz}$,第二次选频在频率点为 19 kHz 对应的 AD 值最小,故优选的谐振频率为 19 kHz 。从图 9 中可知,理论分析与仿真分析完全一致。

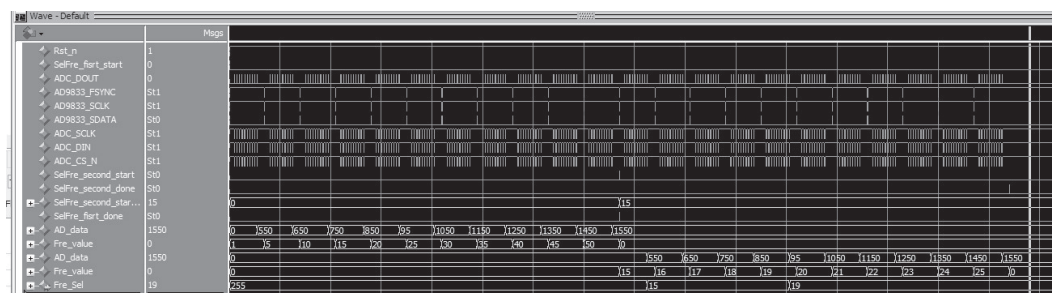


图 9 自动窗口选频仿真时序

Fig.9 Automatic window frequency selection simulation timing

4 自适应选频技术测试

4.1 在空气中测试

对定制的两批线圈进行谐振频率检测,检测的方法有 2 种:第一种是扫频法,用信号发生器产生不同频率的正弦信号,观测定制线圈分别在哪个频率时的接收信号强度最大,就是该线圈的谐振频率。第二种是自适应选频法,分别检测定制线圈的谐振频率。扫频法需要发射线圈,定制线圈作为接收线圈;自适应选频法直接在定制线圈上进行谐振频率检测。为检验自适应选频法的正确性,可用扫频法测得的结果与自适应选频法测得的结果进行对比。为使两种方法检测的结果具有对比性,实验数据摘取谐振频率处于 1~50 kHz 的定制线圈。扫频法检测如图 10 所示;自适应选频法检测如图 11 所示。

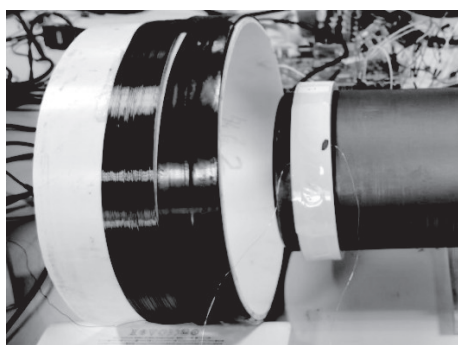


图 10 扫频法检测

Fig.10 Detection by frequency sweep method

第一批定制线圈套 NC50 接头,用扫频法和自适应选频法测得的谐振频率,共计 19 组,第一批定制线圈扫频和选频对比如图 12 所示。由图 12 可以看出,考虑选频精度为 1 kHz,第一批定制线圈选频法检测的结果与扫频法检测的结果,二者是相同的。第二批定制线圈套磁环和接头,用扫频法和自

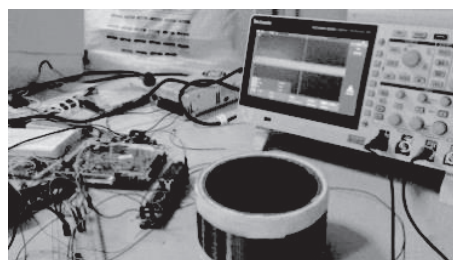


图 11 自适应选频法检测

Fig.11 Detection by adaptive frequency selection method

适应选频法测得的谐振频率,共计 24 组,第二批定制线圈扫频和选频对比如图 13 所示。由图 13 可以看出,考虑选频精度为 1 kHz,第二批定制线圈选频法检测的结果与扫频法检测的结果,二者也是相同的。

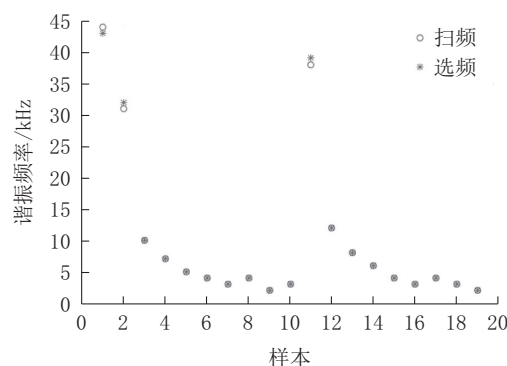


图 12 第一批定制线圈

Fig.12 The first batch of customized coil

4.2 在模拟环境中测试

将自适应短传的发射机和接收机分别组装完毕后,连接上发射线圈和接收线圈,并将收发线圈放置在恒温水浴箱中,模拟井下环境进行功能测试。模拟井下环境是通过不同电导率的盐水和不同温度的盐水进行的。图 14 是自适应短传在模拟井下环境

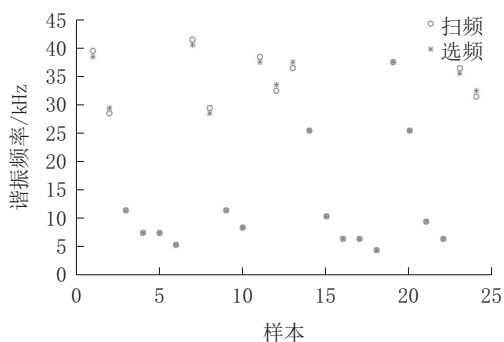


图13 第二批定制线圈

Fig.13 The second batch of customized coil

中测试;图15是发射端和接收端显示波形。经过实测,该系统在模拟环境下能够稳定运行1天以上。

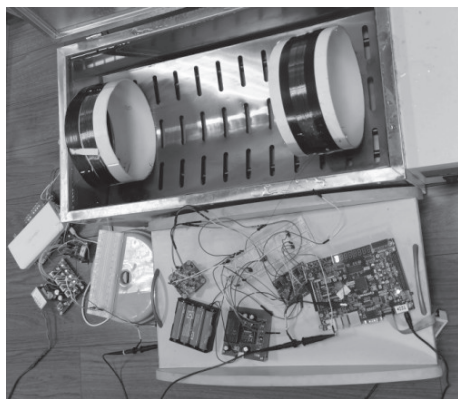


图14 模拟井下环境测试

Fig.14 Simulated downhole environment testing



图15 测试信号

Fig.15 Test signal

5 结论

(1)从选频的准确性、精度和快慢,对比4种自适应选频算法,并重点分析自动窗口算法的边沿检测能力,确定自动窗口算法是更合理的自适应选频算法。

(2)自适应选频技术有硬件电路和应用程序两

部分,硬件电路设计主要包含DDS芯片、信号偏置、功率放大、井下线圈和外接检测电路等,应用程序设计主要是自动窗口算法的植入和仿真;经过实测,在选频精度范围内,自适应选频与扫频结果完全相同。

(3)与扫频法相比,自适应选频技术的优势是:只需要井下线圈本身就可以进行谐振频率检测,不依赖额外的发射线圈配合;在相同的精度下,自适应选频优选至谐振频率所用的时间远小于扫频法。

(4)自适应选频技术应用在井下无线短传,在模拟环境中,稳定性比较可靠。

井下线圈的自适应选频技术可以应用在旋转导向的旋转变压器设计上,研制自适应旋转变压器,提高电能传输效率;可以应用在井下无线短传上,提高短传通信的稳定性;可以应用在近钻头的前探测上,提供一种新的岩性识别方法。

参考文献(References):

- [1] 贾平军,郑毅.中国石油钻井技术发展综述[J].钻采工艺, 2009,32(1):1-6.
JIA Pingjun, ZHENG Yi. Overview of CNPC drilling technology development[J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(1):1-6.
- [2] 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.
- [3] 原宏壮,陆大卫,张辛耘,等.测井技术新进展综述[J].地球物理学进展,2005,20(3):786-795.
YUAN Hongzhuang, LU Dawei, ZHANG Xinyun, et al. An overview of recent advances in well logging technology[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(3):786-795.
- [4] 王小宁.地层评价与测井技术新进展:第62届SPWLA年会综述[J].测井技术,2021,45(5):451-458.
WANG Xiaoning. Advances in formation evaluation and well logging technology: Overview of the SPWLA 62nd annual logging symposium[J]. Well Logging Technology, 2021, 45(5): 451-458.
- [5] 唐清,刘晓民.地质导向技术在塔河三叠系油藏水平井钻井中的应用[J].钻采工艺,2015,38(2):39-42,8.
TANG Qing, LIU Xiaomin. Application of geosteering drilling technology in horizontal well of Tahe Triassic reservoirs[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(2):39-42,8.
- [6] CLARK B, ALLEN D F, BEST D L, et al. Electromagnetic propagation logging while drilling: theory and experiment[J]. SPE-18117-PA, 1990.

- [7] HUANG F S C, COOPE D, SHEN L C. The theory of 2 MHz resistivity tool and its application to measurement-while-drilling [J]. The Log Analyst, 1984, 25(3): 1-11.
- [8] 郝以岭, 杜志强. OnTrak随钻测井资料在冀东油田地质导向中的应用[J]. 测井技术, 2009, 33(2): 148-152, 156.
HAO Yiling, DU Zhiqiang. Application of geosteering service based on OnTrak MWD/LWD platform in Jidong Oilfield [J]. Well Logging Technology, 2009, 33(2): 148-152, 156.
- [9] 宋殿光, 段宝良, 魏宝君, 等. 倾斜线圈随钻电磁波电阻率测量仪器的响应模拟及应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(2): 67-74.
SONG Dianguang, DUAN Baoliang, WEI Baojun, et al. Response simulation and application of electromagnetic wave resistivity measurement-while-drilling tool with tilted coil [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(2): 67-74.
- [10] 陈鸣, 马帅, 张智凯. 高分辨率伽马成像技术在地质导向中的应用[J]. 海洋石油, 2016, 36(4): 71-75.
CHEN Ming, MA Shuai, ZHANG Zhikai. Application of high-resolution gamma ray imaging technology to geosteering [J]. Offshore Oil, 2016, 36(4): 71-75.
- [11] 王珺, 陈鹏, 骆庆峰, 等. 随钻方位伽马测井仪器设计及试验[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(1): 476-481.
WANG Jun, CHEN Peng, LUO Qingfeng, et al. Design and test on azimuthal gamma ray instrument of logging while drilling [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(1): 476-481.
- [12] 作杰, 史盼盼, 陈延军, 等. 阵列感应测井在斜井和水平井中的响应特性[J]. 测井技术, 2016, 40(2): 152-160.
WU Jie, SHI Panpan, CHEN Yanjun, et al. Response characteristics of array induction logging in deviated and horizontal well [J]. Well Logging Technology, 2016, 40(2): 152-160.
- [13] Alpak F O, Dussan E B, Habashy T M. Numerical simulation of mud-filtrate invasion in horizontal wells and sensitivity of analysis of array induction tool [J]. Geophysics, 2002, 44(6): 396-411.
- [14] STEPHEN P. Recent advances in well logging and formation evaluation [J]. World Oil, 2008(3): 89-94.
- [15] 侯芳. 国外随钻测量/随钻测井技术在海洋的应用[J]. 石油机械, 2016, 44(4): 38-41.
HOU Fang. Marine application of foreign MWD/LWD technology [J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(4): 38-41.
- [16] 朱桂清, 章兆洪. 国外随钻测井技术的最新进展及发展趋势 [J]. 测井技术, 2008, 32(5): 394-397.
ZHU Guiqing, ZHANG Zhaoqi. Recent advances in foreign logging while drilling technology [J]. Well Logging Technology, 2008, 32(5): 394-397.
- [17] 代志平. 超声波在钻柱中的传播特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007.
DAI Zhiping. Study on the rule of ultrasonic transmission along drill string [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2007.
- [18] 聂世均. 超声波在泥浆中的传输规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007.
NIE Shijun. Study on the law of ultrasonic transmission in mud fluid [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2007.
- [19] 王慧梅. 导向钻井工具中的声波短传系统研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2009.
WANG Huimei. The research of acoustic wave short hop transmission system in guidance well drilling tool [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2009.
- [20] 王建华. 声波测井技术综述[J]. 工程地球物理学报, 2006, 3(5): 395-400.
WANG Jianhua. A summary of sonic logging techniques [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2006, 3(5): 395-400.
- [21] WHARTON R P, HAZEN G A, RAU R N, et al. Advances in electromagnetic propagation logging [C]//Proceedings of the SPE Rocky Mountain Regional Meeting, 1980.
- [22] DOLL H-G. Electromagnetic Well Logging System: 2582314 [P]. 1952-01-15.
- [23] Lashgari H R, Chu D, Xie S, et al. Composition dependence of the microstructure and soft magnetic properties of Fe-based amorphous/nanocrystalline alloys: A review study [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2014, 391(3): 61-82.
- [24] Josefina M, Emilia I. Effects of air annealing on Fe-Si-B-M-Cu (M=Nb, Mo) alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 610: 180-183.
- [25] 陈庆, 江涛, 刘昶, 等. 一种双谐振型近钻头信号短传系统: 202010448433.9 [P]. 2021-12-31.
CHEN Qing, JIANG Tao, LIU Chang, et al. A short transmission system for dual-resonant near-bit signal: 202010448433.9 [P]. 2021-12-31.

(编辑 荐华)