

基于嵌入式技术的声波测井阵列式声系测试系统

刘栋, 鞠晓东*, 卢俊强, 门百永

中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, teamo_0911@sina.com

收稿日期: 2020-05-13

国家自然科学基金项目(11734017、11374371)、国家科技重大专项(2017ZX05019001、2017ZX05019006)和中国石油科技创新基金项目(2016D-5007-0303)联合资助

摘要 为增加测井解释的准确性, 目前声波测井仪器正向复杂阵列化发展, 仪器的复杂化提高了对稳定性的要求, 同时也增加了仪器声系组装、调试的难度。为提高测井设备研发和现场故障诊断的效率, 更好地验证声波测井阵列式声系的有效性、性能一致性, 设计并实现了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)的阵列式声系检测系统, 并应用其进行声波测井阵列式声系测试。测试中, 通过标准接收换能器测试了测试系统发射装置的幅度、频率调整范围; 通过标准发射换能器验证了测试系统接收装置的接收一致性。并将测试系统应用到实际声系的测试中, 通过理论模拟与实际测量数据的对比分析, 发现该系统能够很好地检测接收声系各通道的有效性和一致性, 并单独对发射声系的单极子和偶极子模式进行性能评价, 同时可以对换能器阵列进行刻度, 为实际测井中资料处理作参考。本系统主要包括以下两个部分: 基于嵌入式 uclinux 系统和网络互连的主从式系统架构, 以基于 ARM 技术的芯片为硬件核心, 上位机通过以太网接口与嵌入式前端机通讯, 实现发送控制命令与接收上传数据的功能, 并完成数据处理、图显、存储等任务, 嵌入式前端机与声系检测电路板通过扩展 I/O 总线相连, 完成各调试功能的控制、数据采集、网络互连等功能; 基于 FPGA 的声波发射装置和接收装置以及相应的数据处理模块, 声波发射装置由扬声器、波形发生电路、数模转换电路、滤波电路及程控放大电路构成, 声波接收装置由拾音器、滤波电路、程控放大电路及模数转换电路构成。该系统不仅可以快速检测仪器声系的工作状态, 而且能够提高仪器研发和维修过程中的层次性、科学性和调试诊断的效率。

关键词 声波测井; 阵列式声系; 检测技术; FPGA; 嵌入式

Embedded-technology-based acoustic logging array sonde testing system

LIU Dong, JU Xiaodong, LU Junqiang, MEN Baiyong

State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract In order to increase the accuracy of well logging interpretation, the acoustic logging tool array sonde is becoming more complex. The complexity of logging tools not only improves the requirement of stability, but also increases the difficulty of acoustic logging tool array sonde assembling and debugging. In order to solve the problem of long times and low precision debugging for an array acoustic sonde, and to verify the effectiveness and consistent performance of the sonde, a new embedded array sonde test system based on a field-programmable gate array (FPGA) was designed and implemented. In the experiment, the

引用格式: 刘栋, 鞠晓东, 卢俊强, 门百永. 基于嵌入式技术的声波测井阵列式声系测试系统. 石油科学通报, 2020, 03: 337-348

LIU Dong, JU Xiaodong, LU Junqiang, MEN Baiyong. Embedded-technology-based acoustic logging array sonde testing system. Petroleum Science Bulletin, 2020, 03: 337-348. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.03.029

amplitude and frequency adjustment range of the test system acoustic transmitting device was tested by the standard receiving transducer, and the consistency of the test system acoustic receiving device was verified by the standard transmitting transducer. The test system was applied to a test of the actual acoustic sonde. Through the comparison and analysis of the theoretical simulation and the actual measurement data, it was found that the test system can detect the effectiveness and consistency of each channel of the acoustic receiving sonde, and evaluate the performance of the monopole and dipole of the transmitting acoustic sonde separately. At the same time, the test system can calibrate the transducer array, which can be used as a reference for data processing in actual well logging. This system mainly includes the following two parts, the first part is the master-slave system architecture based on an embedded uClinux system and network interconnection, with the chip based on ARM technology as the hardware core. The upper computer communicates with the embedded front terminal through the Ethernet interface, realizes the functions of sending control commands and receiving data, and completes the tasks of data processing, graphic display, storage, etc. The embedded front terminal connects with the circuit board of the test system through the extended I/O bus to complete the control, data acquisition, network interconnection and other debugging functions. The second part is the acoustic transmitting device and acoustic receiving device with a data processing module, which is based on a FPGA. The acoustic transmitting device is composed of a loudspeaker, waveform generating circuit, digital-analog conversion circuit, filtering circuit and program-controlled amplifying circuit. The sound wave receiving device is composed of a sound pickup device, filtering circuit, program-controlled amplifier circuit and analog-digital conversion circuit. The system can be effectively used in the performance assessment of an array acoustic sonde and transducer array calibrating, which contributes to improving the assembly and maintenance efficiency of the acoustic logging tool.

Keywords acoustic logging; array sonde; testing technology; FPGA; embedded

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.03.029

0 引言

声波测井仪器一般都由发射声系、接收声系和信号处理系统组成并进行协调工作^[1-2]。目前为减少测井解释的不确定性,现代仪器多采用多信息融合的方法,并向大规模复杂阵列化方向发展,极大地增加了声系组装、调试和维修的难度与复杂度。例如方位远探测反射声波测井仪器,有源发射声系内包含6个单极发射换能器及8个偶极发射换能器,有源接收声系中含有80个声波接收换能器及相应的数据采集处理通道,应用传统方法工作难以进行。阵列化声系的有效性和一致性影响测量的精度和可信度,直接决定测井作业的成败,井下高温高压环境对阵列化声系的稳定性和可靠性也提出了很高的要求。为了方便测试阵列化声系的性能,提高声系组装调试和维修诊断的科学性和效率,需要研发专门的声系测试设备。

目前国际知名油服公司,如斯伦贝谢、贝克休斯等,有自己的专业队伍进行现场测井作业及测井仪器维护,对中国在高端测井仪器研发生产和仪器调试设备制造上均有不能程度的技术封锁,迄今为止没有详细的测试系统发布。在中国,许多科技工作者在长期实践的基础上,总结了声波测井仪器常用故障检修方法。孙东利等人设计了电子模拟声系,能够提供幅度和时差可调的声波模拟信号,可以对多通道采集系统的电子线路进行对比调试和一致性分析^[3]。刘路

扬等人设计了基于S3C2440 ARM9和嵌入式Linux的调试系统用于现场维护和保障随钻声波测井仪^[4]。声波测井实验室在研制声波仪器的同时,对测井仪器的调试台架也进行了长期研究,搭建了测井仪器调试台架系统架构,设计了测井仪器调试台架前端机软件,设计了供电、通信、存储测试等功能的测井仪器调试台架通用硬件系统,同时完成了针对方位远探测、阵列感应等不同仪器的调试台架设计^[5-10]。近几年,随着物联网、大数据和人工智能等技术的发展,调试诊断工作朝着智能检测和预测性维护的方向发展^[11]。但是前文所提到的检测方案需要将发射及接收声系放置于水槽或者充满水的套管中,而且要将声系挂接到包含遥传及地面系统的整个测井系统上,存在费时费力、操作复杂的缺点,没有形成一套针对声系进行系统性检测的设备,只能处理单一故障,对综合性问题容易出现误诊断。

针对上述问题,本文构建了一种基于ARM的嵌入式调试框架,设计了两路声波信号发射装置和接收装置。通过声系组装过程中的接触式检测及调试诊断过程中的非接触式检测,验证了声系电路及换能器的有效性与一致性。在此基础上,将声场模拟结果与实际结果相对比,验证了该测试系统的可行性与有效性,并且对通过该测试系统可以对换能器进行刻度,为实际测井中资料处理做参考。该测试系统对声波测井仪器研发和维修过程中的软硬件调试、优化具有重要意

义，且有助于声波测井方法的深入研究。

1 基于 ARM 的嵌入式系统设计

图 1 所示是声波测井仪声系检测调试台架的整体结构框图。整个台架系统由上位机(笔记本电脑)、嵌入式前端机板和声系检测电路板组成。调试台架采用了基于网络互连的主从式系统架构，嵌入式硬件核心为基于ARM7TDMI技术的S3C44B0X，ARM处理器中运行uClinux 嵌入式操作系统^[2]。上位机通过 10 Mbps 以太网接口与嵌入式前端机板通讯，主机可以实时发送控制命令到前端机，同时接收前端机上传的数据。嵌入式前端机板与声系检测电路板通过扩展 I/O 总线相连。上位机负责完成数据处理、图显、存储

以及与嵌入式前端机板的网络连接；嵌入式前端机板主要完成各调试功能的控制、数据采集、网络互连等功能。

2 声波发射装置设计

声波发射装置通过可调支架固定在接收声系待测接收阵上，测试示意图如图 2 所示。扬声器安装在装置的机械骨架上，模拟声波信号通过扬声器发射，扬声器到接收换能器的距离可调，并可以仪器中心为圆心绕仪器旋转。

声波信号发射器模块以一片百万门规模的FPGA作为控制核心；采用单通道 16 位数模转换器(DAC)进行数模转换；采用低噪声运算放大器对信号进行滤波、

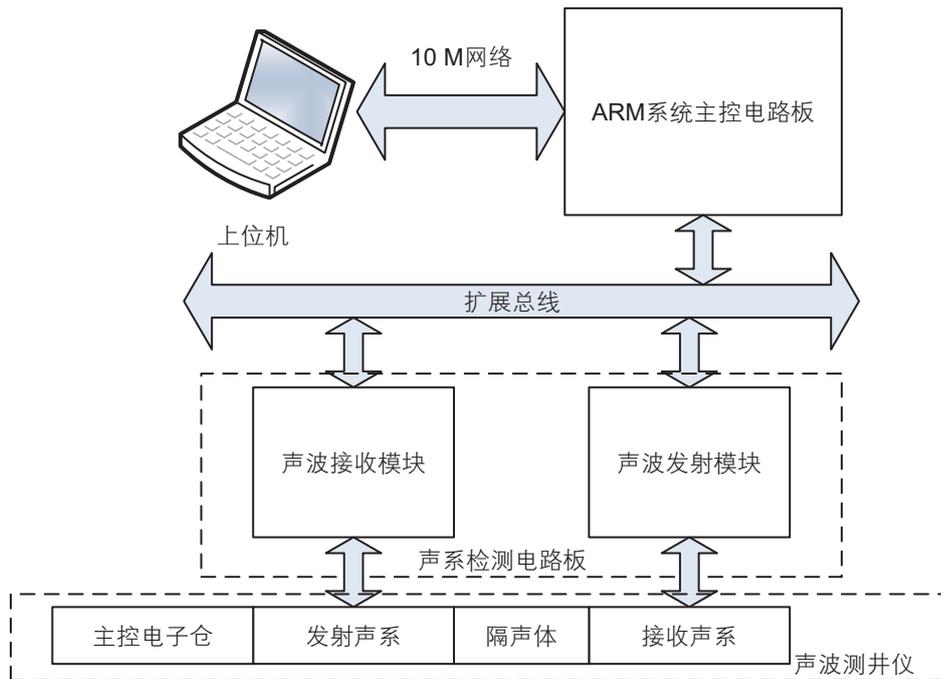


图 1 声系检测台架整体架构

Fig. 1 The overall acoustic logging tool test bench framework

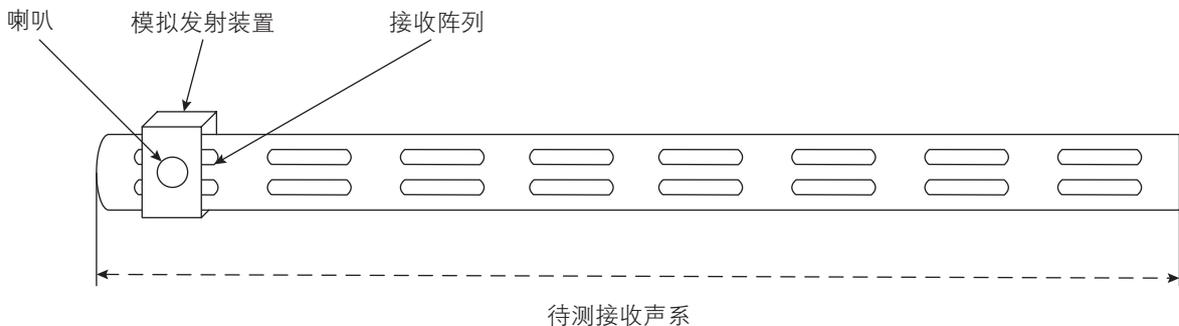


图 2 声波发射装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of acoustic transmitting device

增益调节等处理,产生频率范围在 200 Hz~20 kHz 的任意波形。声波发射器设计功能框图如图 3 所示。

DDS(Direct Digital Synthesizer)技术是波形发生器的核心,具有低成本、低功耗、高分辨率和快速转换时间等优点^[13]。FPGA 自带的RAM用来存储不同类型的波形数据文件。设计了最大频率可达 20 kHz、最小频率 20 Hz,频率分辨率为 10 Hz且连续可调的波形发生模块,通过不同频率不同幅度的信号叠加可模拟不同地层信号。图 4 为利用DDS技术生成的几种不同波形,从中可看出生成的波形稳定精确。

数模转换电路主要由 AD5541A 及其外围元器件组成,AD5541A 是 ADI 公司的单通道、16 位、串行输入、无缓冲电压输出的高性能数模转换器(DAC),用来将 FPGA 内部 RAM 中输出的数字信号在 FPGA 的控

制下转化为电压波形信号。

信号处理电路主要包括滤波电路、程控放大网络:滤波电路主要由高性能低噪声双运放 SA5532 和与其进行参数匹配的电阻和电容构成。程控放大网络主要由一个单芯片 CMOS 模拟多路复用器 ADG408 和多个串联电阻构成,ADG408 在 FPGA 的控制下通过选择不同的串联电阻端实现不同级别放大。

3 声波接收装置设计

声波接收装置与发射装置类似,通过可调支架固定在发射声系待测发射换能器上,测试示意图如图 5 所示。声信号通过拾音器输入到采集模块,麦克安装在装置机械骨架上,到发射换能器的距离可调,并可

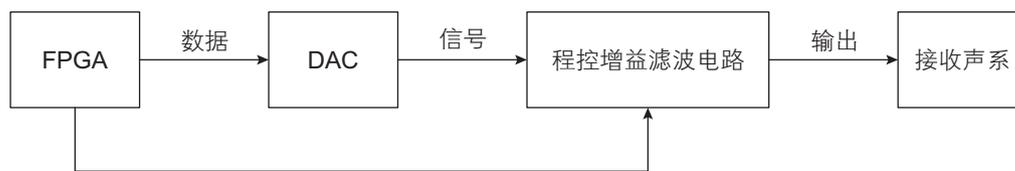


图 3 声波发射控制模块结构

Fig. 3 Acoustic transmitting controlling module structure

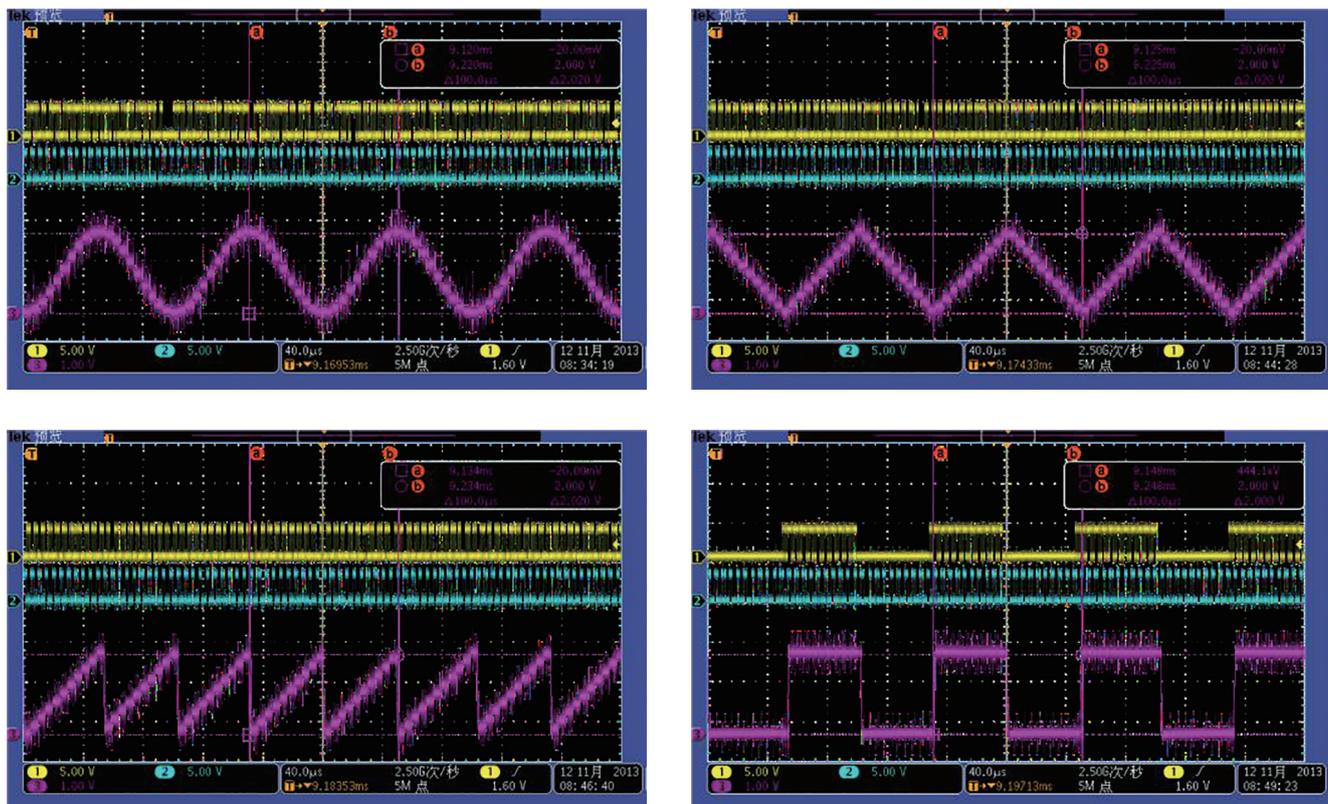


图 4 利用 DDS 技术模拟输出波形

Fig. 4 Analog waveforms output via DDS

以仪器中心为圆心绕仪器旋转。

本文设计了一个频率范围为 200 Hz~20 kHz，同步数据采集，分辨率为 16 位，最小采样间隔为 2 μs，采集深度为 1024 点的两路声波接收装置，可以对声系进行组装过程中的接触式检测及调试诊断过程中的非接触式检测。

声波接收模块设计的功能框图如图 6 所示，通过拾音器接收声波信号，声波信号转换为电信号后经过信号放大、滤波等处理。通过时钟发生器控制 ADC 电路对信号进行转换，转换完成的信号通过传输接口传到 ARM7 扩展 I/O 总线上。其中接口电路由 FPGA 实现与 ARM 核心板的接口，接收控制板下发的命令。控制电路通过 ARM 扩展总线接收控制命令，对接收到的命令进行译码，并按照以上参数产生发射逻辑，启动采集数据的读取并存储。

前置采集电路主要由麦克 CMB-6544、ADA4941-1 芯片和电源部分组成。麦克接收声波换能器信号，并经 ADA4941 将信号由单端转为差分信号再输入增益滤波电路。麦克工作电压为 4.5 VDC，工作频率在 200 Hz~20 kHz 范围。ADA4941 是一款低噪声、低功耗的差分驱动器，它可以驱动功耗敏感系统中最高 18 位 ADC，同时提供驱动高分辨率 ADC 所需的低失真和高信噪比(SNR)等性能参数。可以有效的

提高信号的抗干扰能力，保证声波信号的完整性。

信号处理电路主要包括滤波电路、程控放大网络。滤波电路由低功耗高精度仪表放大器 INA128、性能低噪声双运放 SA5532 和与其进行参数匹配的电阻和电容构成，将差分信号转换成单端信号并滤波。程控放大网络主要由一个单芯片 CMOS 模拟多路复用器 ADG408 和多个串联电阻构成，ADG408 在 FPGA 的控制下通过选择不同的串联电阻端实现不同级别的放大。

模数转换电路(ADC)由 AD 采集芯片 AD7677 和驱动配置芯片 ADA4941 构成，AD7677 是 ADI 公司生产的 16 位、单通道、并行输入、积分非线性的高性能 ADC 芯片。ADA4941 为单端转差分驱动。ADC 用来将采集的声波信号在 FPGA 的控制下转换成数字信号并通过嵌入式前段机上传到上位机。

4 测试系统检测

4.1 声波发射装置测试

利用实验室标准接收换能器测试声波发射装置，并将测到的波形在通过接收测试软件在上位机显示出来，图 7 为上位机采集波形界面。并根据采集到的波

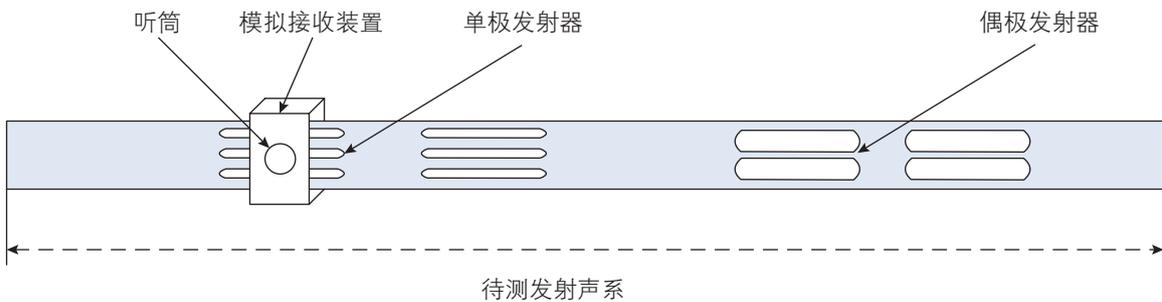


图 5 发射声系测试方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of acoustic receiving device

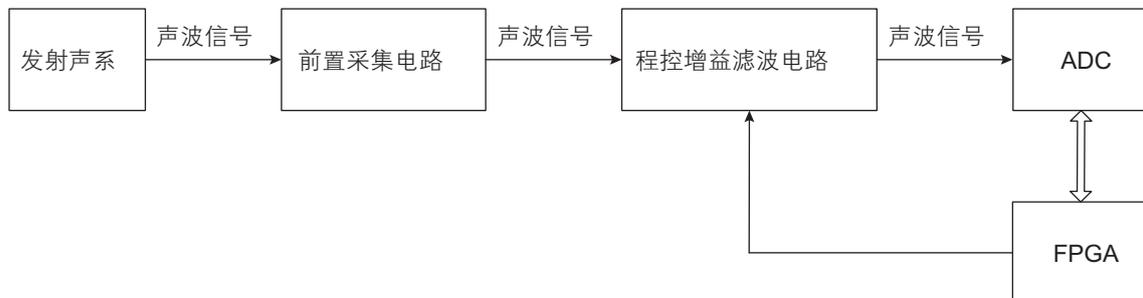


图 6 声波接收控制模块结构

Fig. 6 Acoustic receiving controlling module structure

形数据分别计算频率及声压级(发射电压响应级)。最终测得装置可发出频率范围 200 Hz~20 kHz, 最大声压级为 160 dB 的声波信号, 与设计标准相符。

4.2 声波接收装置测试

利用实验室不同频率的标准发射换能器测试声波接收装置, 根据测试装置接收到的电信号数据计算两路接收通道的一致性通频带特性。表 1 为不同频率下两路接收通道得到的电信号数据。

由表 1 可以看出, 在 2 kHz~20 kHz 的范围内, 接收装置通频带特性较好, 20 kHz 开始, 接收到的电信号幅度有明显的下降, 与设计的参数相符。同时两路接收通道接收到的数据基本相同, 说明接收装置两路接收通道的一致性较好。

5 测试系统应用

该测试装置可以在组装调试阶段和检测维修过程中, 对仪器的阵列化声系进行不同程度的测试。该装置不仅可以对声系各模块进行有效性测试来检测仪器电路是否正常工作, 还可以评价电路和换能器的一致

性。在此以方位远探测声波成像测井仪的声系测试为例, 分别阐述对接收声系和发射声系的测试结果。

5.1 接收声系测试

方位远探测声波测井仪接收声系共有十个接收阵列, 每个阵列有 8 个接收换能器呈 45° 周向分布, 共 80 个接收通道。现选取其中一个阵列(R9)测试其电路和换能器有效性和一致性。

5.1.1 接收声系各采集通道频率响应测试

检测接收声系各通道频率响应时, 在待测仪器的上位机软件上控制接收声系采集通道增益, 使声系接收通道的增益保持不变。让测试系统声波发射装置发出不同频率的正弦波信号, 测量采集通道的通频带特性。

在增益不变的情况下, 让测试系统发出固定幅度的信号, 频率从 200 Hz 开始, 步长为 2000 Hz, 到 24 200 Hz 截止的不同频率的正弦波。从待测仪器的上位机软件上记录各通道的输入波形, 根据各通道的实际数据计算增益, 并对所得数据归一化处理, 可得到采集通道的归一化频率响应特性。选取同一接收阵 8 个通道中的 4 个通道的数据为例, 如图 8 所示。

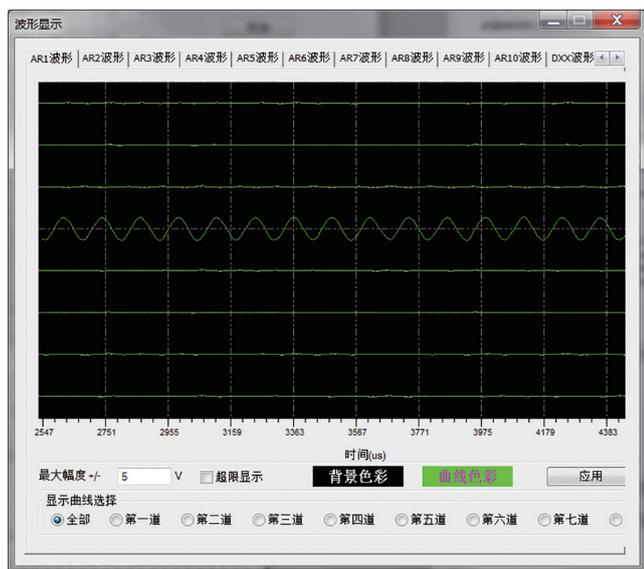


图 7 声波发射装置输出波形

Fig. 7 Waveform of acoustic transmitting device

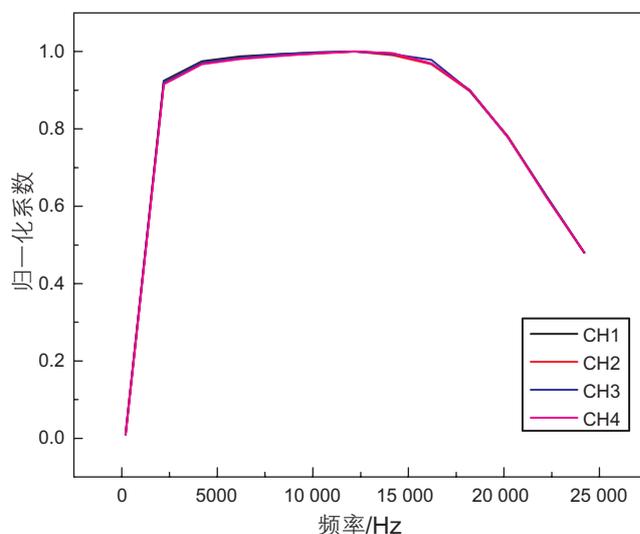


图 8 采集通道的归一化频率响应特性

Fig. 8 Normalized frequency response characteristic of acquisition channel

表 1 接收通道测试数据表

Table 1 Test data of receiving channels

频率/kHz	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
CH1/mV	12.51	13.33	13.53	13.63	13.7	13.75	13.72	13.42	12.58	11.02	8.95	6.86
CH2/mV	12.53	13.31	13.51	13.58	13.64	13.69	13.63	13.28	12.38	10.77	8.71	6.66

从图 8 可知, 4 个通道的归一化通频带特性相近, 满足电路一致性的要求, 且信号在 2 kHz~20 kHz 范围内衰减很小, 说明采集通道能够正常地实现带通滤波功能, 满足声波测井仪对采集处理通道进行宽频带放大的要求。

5.1.2 接收声系各采集通道程控增益测试

模拟通道板的增益控制模块是仪器对不同强度的声信号进行自适应并调节增益的关键, 必须进行准确的测试。仪器中的模拟通道板的增益改变范围在 0~84 dB 且步进量为 6 dB。检测接收声系各通程控增益是否正确时, 在待测仪器的上位机软件上控制接收声系采集通道增益。让测试系统声波发射装置发出固定频率的正弦波信号, 测量采集通道的程控增益是否准确。

选取同一接收阵 8 个通道中的 4 个通道的数据为例, 计算后的数据如表 2 所示。

从表 2 中可以看出, 当增益控制放大倍数相同时,

各通道的实际增益基本一致, 且与预期增益接近, 说明增益控制部分能正常工作。

5.1.3 峰峰值一致性

表 3 为 R9 阵 A1-A8 换能器峰峰值一致性测试的统计表。其中 R9A1 代表第 9 个阵列第 1 号换能器正对喇叭的情况。测试时, 采集了几个工作周期内的接收波形, 读取其直达波的峰峰值, 选取最大峰峰值的那道波形进行归一化处理。所有数据都换算成了测试软件中增益为 0 dB 时的情况。

从表 3 可以看出, 归一化系数在 0.9787~1。由于对仪器进行非接触式测量时有皮囊及声窗的缘故, 接收幅度略有差异, 但依然可视为一致性较好。

5.1.4 时域和频域一致性

图 9 为 R9 阵 A1-A8 的时域波形、频域波形图。由图中可以看出, 主频在 11 kHz~12 kHz 左右, 与换能器参数相符, 频谱一致性也比较好。

表 2 模拟通道板的增益测试表

Table 2 Gain table of the analog channel boards

预期增益	CH1 增益	CH2 增益	CH3 增益	CH4 增益
1	1	0.99	0.98	0.99
2	1.99	1.99	1.98	1.97
4	3.96	3.97	3.92	3.94
8	8.16	8.18	8.15	8.1
16	16.1	16.4	16.3	16.3
32	32.8	32.9	32.7	32.6
64	65.6	65.7	65.4	65.8
128	131.2	131.4	130.8	131.6
256	262.4	262.8	261.7	263.3
512	524.9	525.7	523.2	526.4
1024	1049.6	1051.4	1046.6	1053.1
2048	2099.3	2102.9	2093.3	2106.1
4096	4198.9	4206.1	4186.8	4212.4
8192	8397.1	8412.5	8374.1	8425.3
16 384	16 794.4	16 825.9	16 749.1	16 815.1

表 3 R9 阵 A1-A8 峰峰值一致性统计表

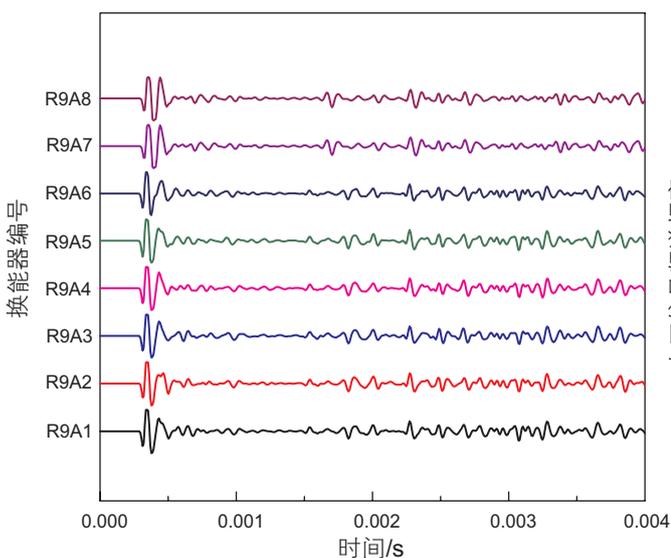
Table 3 R9 A1-A8 peak-to-peak value consistency statistics

换能器编号	R9A1	R9A2	R9A3	R9A4	R9A5	R9A6	R9A7	R9A8
峰峰值电压/mV	47.505	47.515	47.49	46.635	47.41	46.5	47.325	47.31
归一化系数	0.9999	1	0.9995	0.9815	0.9978	0.9787	0.996	0.9957

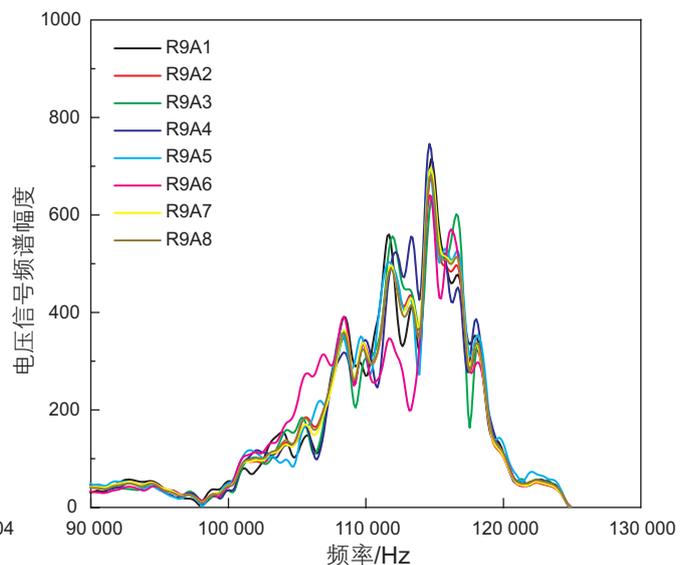
5.1.5 R9A1 通道对不同方位处发射器的接收特性

为了测试接收声系中某一接收通道对不同方向处声源的响应特性,基于互易性原理,固定接收声系,以 45° 为步进,旋转测量装置,测量R9A1在分别在 0° 到 315° 这8个位置接收到的波形(其中 0° 表示正对发射器)。

图10所示为接收通道对不同方位处发射器的接收特性图。可以看出,从时间上讲,8道波形以正对时的波形为对称轴,有很好的对称性。从直达波峰峰值来讲,8个值以 0° 时为对称轴,对称性很好。由此看出一致性比较好。



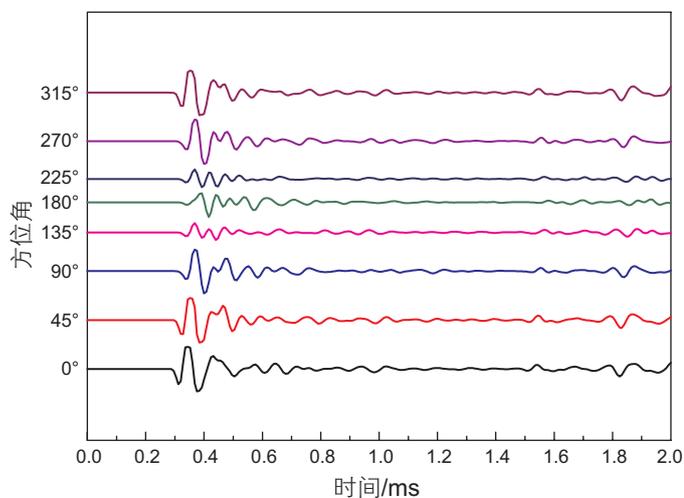
(a) R9阵A1-A8的时域波形图



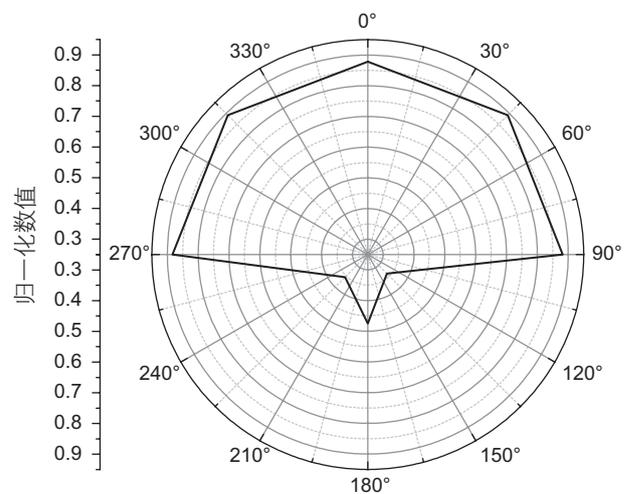
(b) R9阵A1-A8的频域波形图

图9 R9阵A1-A8的时域波形、频域波形图

Fig. 9 R9 Array A1-A8 time and frequency domain oscillograms



(a) 接收通道在不同方位的接收波形



(b) 方位指向性图

图10 接收通道对不同方位处发射器的接收特性图

Fig. 10 Receiving channel attributes towards transducer from different angles

5.2 发射声系测试

方位远探测声波测井仪发射声系有6个单极换能器和8个偶极换能器组成。测试装置固定在声窗位置,测试单极子和偶极子的声场特性。测试方法为:固定测试装置在发射器上,以待测发射器几何中心为圆心,半径200 mm范围内,步进角为 2° 测量单极子发出的信号。然后将这些信号拼接成 360° 范围内的水平指向性波形。

5.2.1 单极换能器声场特性

图11所示为单极换能器的水平指向性。由图可

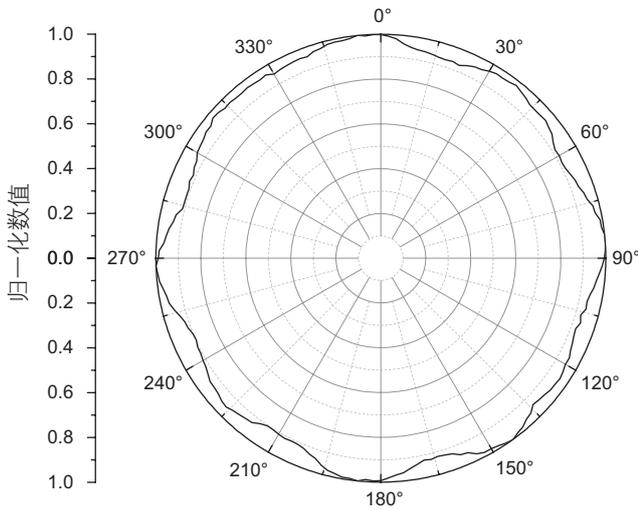


图 11 单极换能器水平指向性
Fig. 11 Horizontal directivity of monopole transmitting transducer

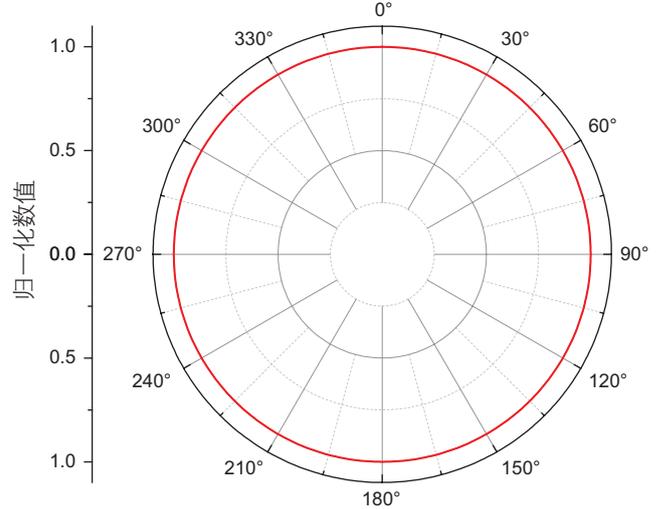


图 12 单极换能器水平指向性数值模拟图
Fig. 12 Numerical simulation of horizontal directivity of monopole transmitting transducer

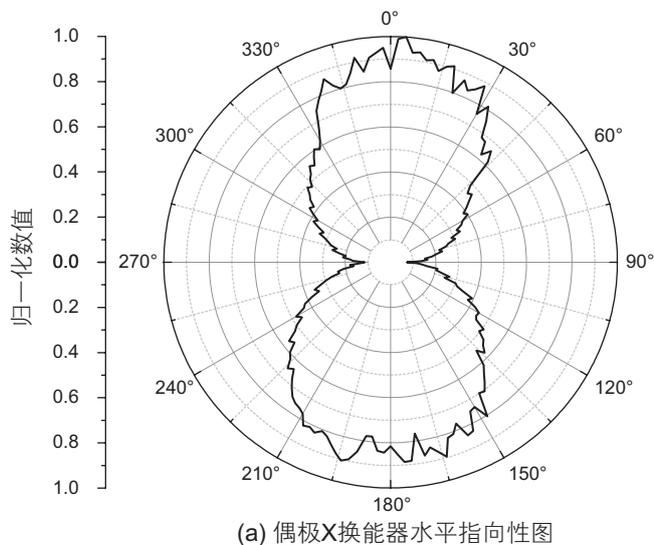
以看出，单极各个方向的峰峰值在 440~500 mV 之间，归一化幅度在 0.85~1 之间，且在 0°、90°、180°、270° 处幅度最大，在 45°、135°、225°、315° 处最小。图 12 所示为单极换能器水平指向性的数值模拟。图 11 与图 12 对比可知，测试结果与数值模拟结果相符，但由于对仪器进行非接触式测量时有皮囊及声窗的缘故，幅度略有差异。此外，换能器制造工艺，也是引起差异的一个重要原因。总体来看，测试的偶极 X、Y 换能器一致性比较好。

5.2.2 偶极发射器声场特性

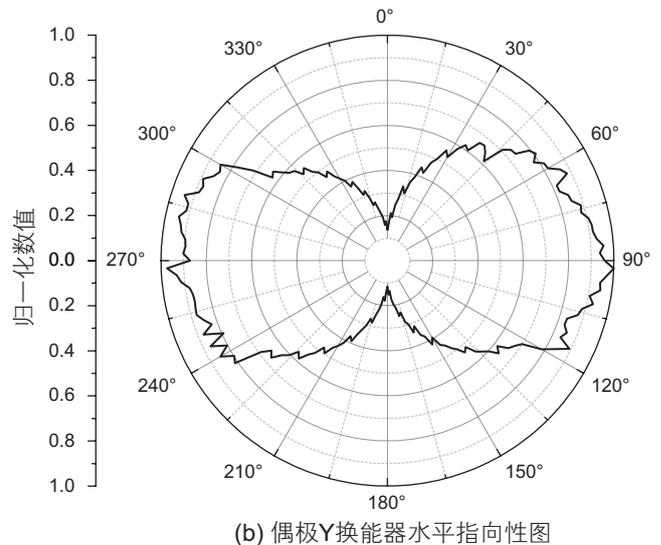
图 13 所示为偶极 X、Y 水平指向性图，图 14 所

示为偶极 X、Y 时域波形图。从图中可以看出，无论偶极 X，还是偶极 Y，水平指向性整体呈现不规则的“∞”字型，且在偶极 X 偶极 Y 的偏振方向幅度最大，与偏振方向相差 90° 幅度最小，波形测试与“∞”字型相符。图 15 所示为偶极 X、Y 换能器水平指向性的数值模拟。图 13 与图 14 对比可知，测试结果与数值模拟结果相符，但由于对仪器进行非接触式测量时有皮囊及声窗的缘故，幅度略有差异。此外，换能器制造工艺，也是引起差异的一个重要原因。总体来看，测试的偶极 X、Y 换能器一致性比较好。

通过对方位远探测声波测井仪发射声系的单极与



(a) 偶极 X 换能器水平指向性图



(b) 偶极 Y 换能器水平指向性图

图 13 偶极 X、Y 换能器水平指向性图
Fig. 13 Horizontal directivity of dipole X and Y transmitting transducer

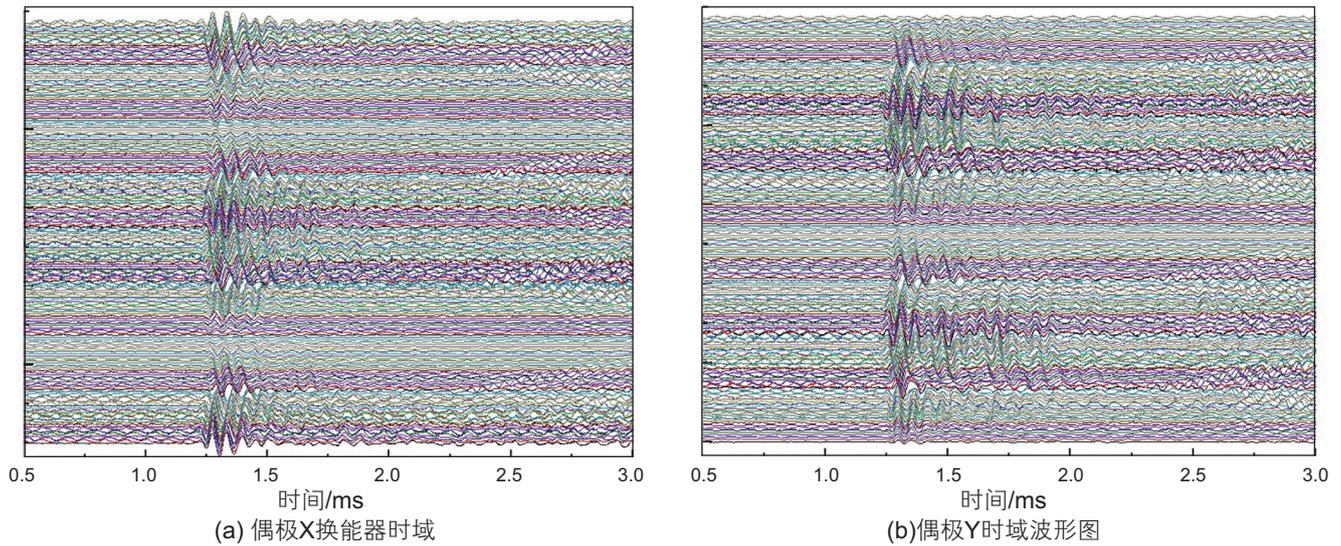


图 14 偶极 X、Y 换能器时域波形图

Fig. 14 Time domain oscillograms of dipole X and Y transmitting transducer

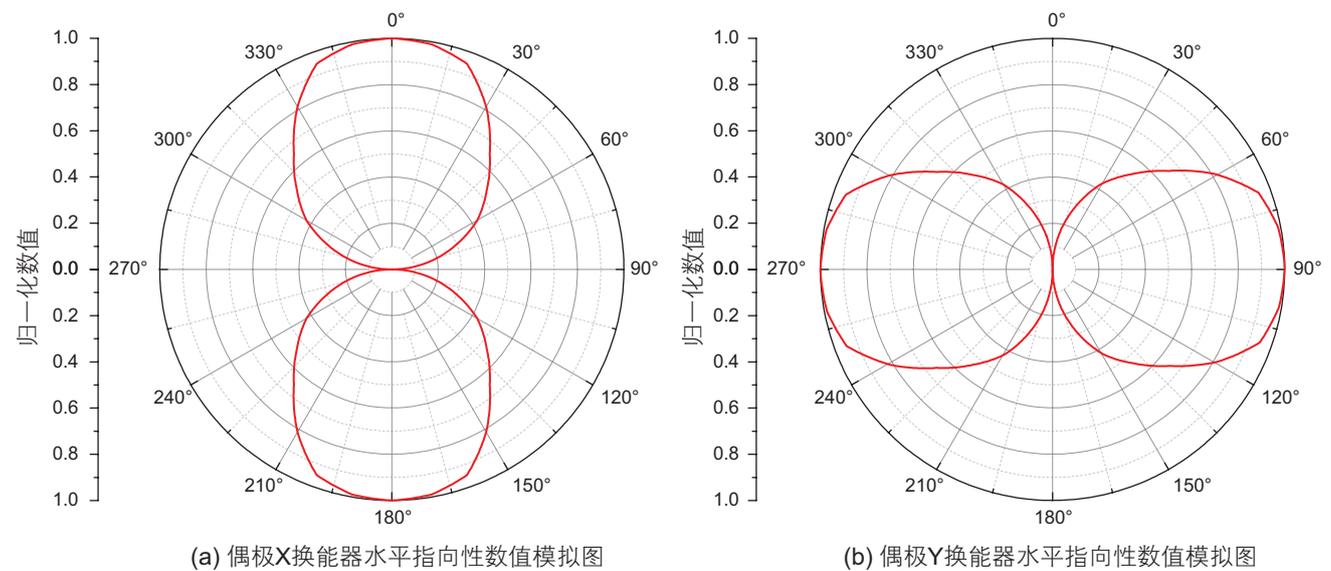


图 15 偶极 X、Y 换能器水平指向性数值模拟图

Fig. 15 Numerical simulation of horizontal directivity of dipole X and Y transmitting transducer

偶极换能器的测试，得到了单极与偶极换能器的声场特性，并将测试结果与数值模拟结果对比可知，该系统可以有效地测试声波测井仪器阵列式发射声系，并对其进行评价。

5.3 接收换能器阵列刻度

由于并不能保证接收换能器阵列的一致性都很好，同时随着仪器的长时间使用，换能器也会出现老化的情况，因此需要对换能器阵列进行刻度。下面以 R5 阵举例说明。表 4 为 R5 阵 A1-A8 换能器峰峰值一致性

测试的统计表。

从表 4 中可看到 R5A6 号换能器与其他换能器接收峰峰值有明显差距，因此该换能器接收到的数据需处理后才能使用，这里采用幅度加权的方式进行处理。处理后的 R5A6 值为 47.295 mV，加权系数为 1.1395。

表 5 为实际测井中得到的一组 R5 阵 A1-A8 换能器接收到的数据。

从表 5 中可以看出，加权处理的数据归一化之后一致性很好，经过刻度之后的换能器阵列满足正常工作需要，保障了测量数据的有效性，为实际测井数据

表4 R5 阵 A1-A8 峰峰值一致性统计表

Table 4 R9 array A1-A8 peak-to-peak value consistency statistics

换能器编号	峰峰值电压/mV	归一化系数
R5A1	47.518	0.9994
R5A2	47.543	1.0000
R5A3	47.483	0.9987
R5A4	46.835	0.9851
R5A5	47.441	0.9978
R5A6	41.505	0.8730
R5A7	47.315	0.9952
R5A8	46.931	0.9871

表5 R5 阵 A1-A8 实际测井数据

Table 5 Actual well logging of R5 array A1-A8

换能器编号	接收数据/mV	加权后结果	加权后归一化系数
R5A1	437.253	437.253	0.9992
R5A2	435.984	435.984	0.9963
R5A3	436.763	436.763	0.9981
R5A4	437.582	437.582	1.0000
R5A5	436.724	436.724	0.9980
R5A6	383.493	436.929	0.9985
R5A7	437.182	437.182	0.9991
R5A8	437.017	437.017	0.9987

处理提供参考。

6 结论

(1) 本文设计了一种基于FPGA的声波测井仪器阵列式声系测试系统,并将其挂接在基于ARM+uCLinux嵌入式技术的调试台架上,具备检测声波测井仪器阵列式声系有效性和性能一致性的功能。

(2) 本文对声波测井仪阵列式声系进行接触式、非

接触式测量,测试了换能器、电路的有效性和一致性,验证了该测试系统的性能;并能够对换能器阵列进行刻度,有效地保证了仪器实际应用中测量数据的有效性,提高测井资料的解释精度。

(3) 实验结果表明,该测试系统能够对声波测井仪器阵列式声系进行快速、有效的检测,可显著提升组装和维修过程中的检测与诊断效率,对测井方法的研究和验证具有一定的促进作用,同时对其他类型声波测井模拟信号发生器的研究具有借鉴意义。

参考文献

- [1] 鞠晓东, 乔文孝, 赵宏林, 等. 新一代声波测井仪系统设计[J]. 测井技术, 2012(05): 71-74. [JU X D, QIAO W X, ZHAO H L, et al. System Design of a new acoustic logging tool[J]. Well logging technology, 2012(05): 71-74.]
- [2] 卢俊强, 鞠晓东, 成向阳. 正交偶极阵列声波测井仪的设计[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008(01): 50-54. [LU J, JU X D, CHENG X Y. Design of a cross-dipole array acoustic logging tool[J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 5(2): 50-54.]
- [3] 孙东利. 声波测井仪模拟声系的设计[J]. 国外测井技术, 2015, 209(05): 71-73. [SUN D L. Design of the sound simulation system in an acoustic tool[J]. World well logging technology, 2015, 209(05): 71-73.]
- [4] 刘路扬, 师奕兵, 张伟. 随钻声波测井井下仪器现场维护与保障系统设计[J]. 测控技术, 2011, 030(005): 68-72. [LIU L Y, SHI Y B, ZHANG W. Design of field maintenance and protection system on acoustic logging-while-drilling and down-hole Instrument[J]. measurement & control technology, 2011, 030(005): 68-72.]
- [5] 鞠晓东, 成向阳, 卢俊强, 等. 基于嵌入式架构的测井仪器调试台架系统设计[J]. 测井技术, 2009, 33(3): 270-274. [JU X D,

- CHENG X Y, LU J Q, et al. Design of Test-bench system for logging tools based on embedded structures[J]. Well logging technology, 2009, 33(3): 270–274.]
- [6] 门百永, 鞠晓东, 乔文孝, 等. 基于嵌入式架构的阵列感应成像测井仪调试台架设计[J]. 科学技术与工程, 2011, 011(011): 2450–2454. [MEN B Y, JU X D, QIAO W X, et al. Design of test-bench system for the multi-frequency array induction imaging logging tool based on embedded structures[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 011(011): 2450–2454.]
- [7] LIU X P, JU X D, QIAO W X, et al. Test-bench system for a borehole azimuthal acoustic reflection imaging logging tool[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2016, 13(3): 295–303.
- [8] 吴文河, 鞠晓东, 成向阳, 等. 基于uClinux的测井仪器调试台架前端机软件设计[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(3): 63–66. [WU W H, JU X D, CHENG X Y, et al. Design of front-end computer software for logging tool test-bench based on uClinux[J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(3): 63–66.]
- [9] 刘先平. 基于嵌入式技术的方位远探测声波成像测井仪调试台架研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016. [Research on embedded-technology-based test-bench system for a borehole azimuthal acoustic reflection imaging logging tool[D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2016]
- [10] 郝小龙. 基于嵌入式技术的测井仪调试台架通用硬件系统研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017. [Research on general hardware system of embedded-technology-based test-bench for logging tool[D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2017]
- [11] Temer E, Pehl H J. Moving toward smart monitoring and predictive maintenance of downhole tools using the industrial internet of things IIoT[C]. The Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, 2017.
- [12] ZHANG K, JU X D, LU J Q, et al. Design of acoustic logging signal source of imitation based on field programmable gate array[J]. Journal of Geophysics & Engineering, 11(4): 045008.
- [13] 贾将, 柯式镇, 张冰, 等. 螺绕环式随钻电阻率成像测井仪发射技术研究[J]. 石油科学通报, 2018, 04: 399–409. [JIA J, KE S Z, ZHANG B, et al. Research on transmitting technology of a LWD resistivity imaging tool with annular solenoid excitation[J]. Petroleum Science Bulletin, 2018, 04: 399–409.]

(责任编辑 廖广志 编辑 付娟娟)