

基于 USB 总线的远探测方位反射声波成像测井仪 数据读取接口设计

谢超^{1,2}, 门百永^{1,2}, 么永超³, 卢俊强^{1,2}, 王邦伟⁴, 刘先平⁵

(1. 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;

2. 中国石油大学(北京)地球物理学院, 北京 102249; 3. 南方科技大学地球与空间科学系, 广东深圳 518055; 4. 中国石油集团测井有限公司西南分公司, 重庆 400021;

5. 中国石油测井有限公司天津分公司, 天津 300280)

摘要: 远探测方位反射声波成像测井仪(BAR)是新一代成像测井仪,其测井数据存储于内部大容量存储模块中;为了实现测井现场快速读取和回放测井数据,设计了一种基于USB总线的数据读取接口;数据读取接口通过USB总线与PC通讯,通过自定义高速串行总线与下井仪数据存储模块通讯;高速串行总线为基于M-LVDS的差分总线,设计的工作频率为80MHz,采用8B/10B编码;数据读取接口电路采用FPGA作为主控芯片,高速总线协议和传输控制均在FPGA中实现;所设计数据读取接口已实现8口井的现场测井数据读取,数据读取速度达到57Mbps;该设计实现了测井数据的现场快速读取和回放,保证了测井数据检验的时效及测井施工的效率。

关键词: 远探测方位反射声波成像测井仪;高速差分总线;8B/10B;现场可编程门阵列;并行控制逻辑

Design of Data Reading Interface for the Borehole Azimuth Acoustic Reflection Imaging Tool Based on USB Bus

XIE Chao^{1,2}, MEN Baiyong^{1,2}, YAO Yongchao³, LU Junqiang^{1,2}, WANG Bangwei⁴, LIU Xianping⁵

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. College of Geophysics, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China;

4. Southwest Branch, CNPC Logging Co., Ltd., Chongqing 400021, China;

5. Tianjin Branch, CNPC Logging Co., Ltd., Tianjin 300280, China)

Abstract: The borehole azimuth acoustic reflection imaging tool (BAR) is a new generation of imaging logging tool, and its logging data, which can't be transmitted to ground for shortage of telecom rate, is stored in an internal mass storage module. In order to realize timely reading and replay logging data infield, a data reading interface based on USB bus is designed. The data reading interface communicates with the PC through the USB bus, and communicates with the down hole data storage module through a custom high-speed serial bus. The high-speed serial bus is a differential bus based on M-LVDS. The designed frequency of the bus is 80 MHz and 8B/10B encoding is employed. The data reading interface uses FPGA as the main control chip, which implement the high speed bus protocol and transmission control. The data reading interface has tested in field, and the data reading rate reaches 57 Mbps. The design realizes the fast reading and replay of logging data, which ensures the timeliness of logging data inspection and the efficiency of logging operation.

Keywords: borehole azimuth acoustic reflection imaging tool; high-speed serial bus; 8B/10B; FPGA; parallel control logic

0 引言

随着勘探开发的不断深入,远离井壁周围空间的探测成为迫切需要的勘探技术^[1-3],中国石油大学(北京)与中国石油集团合作研制的基于相控阵技术^[4-6]的远探测方位反

射声波成像测井仪(BAR)^[7-8]成功实现了带方位分辨能力的远离井壁地质空间的探测。为实现方位分辨能力,BAR采用了阵列化的探测器结构(传感器数量达80个);为实现远距离探测,BAR每个传感器数据采样深度可达8k,因

收稿日期:2021-05-05; 修回日期:2021-05-24。

基金项目:国家自然科学基金项目(11734017);国家科技重大专项(2017ZX05019001,2017ZX05019006);中国石油科技创新基金项目(2016D-5007-0303);中国石油大学(北京)基金(2462016YJRC020)。

作者简介:谢超(1996-),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事测井仪器和装备方向的研究。

引用格式:谢超,门百永,么永超,等.基于USB总线的远探测方位反射声波成像测井仪数据读取接口设计[J].计算机测量与控制,2021,29(8):218-222.

此, 每个深度点总数据量可达 1.2 MB。而现今成熟的电缆测井遥传系统最高通讯速度不超过 1 Mbps^[9-10]。

为解决遥传通讯速度低的瓶颈, BAR 采用了“井下存储, 抽样上传”的工作方式, 即所有测井数据均存储于井下大容量存储器内, 仅抽样部分关键数据上传到地面^[11]。在 BAR 仪器上提到井口后, 需要在现场快速读取测井数据, 通过回放分析软件快速验证测井施工质量是否合格。常规的测井地面系统不具备专用高速数据读取接口, 因此, 需要开发专用的数据读取接口, 以实现 BAR 数据的现场快速读取和回放分析。另外, 数据读取接口应具备独立供电能力, 可以实现井下数据存储电路的供电。

本文设计了一种基于 USB 总线的远探测方位反射声波成像测井仪数据读取接口, 实现了在井场对 BAR 主控短节内的数据存储电路供电和测井数据的快速读取与回放、以及测井质量的检验。

1 数据读取接口整体设计

BAR 测井仪的主控短节内的数据存储模块的供电为 9~15 V, 常温下功耗不超过 2 W, 数据存储模块物理读取速度不高于 10 MB/s, 经过本地文件系统处理后, 数据输出速度约为 8 MB/s。本设计中选用 USB2.0 接口, 即可以满足通讯要求, 也可以为接口电路供电。接口电路与井下仪器数据存储模块的物理连接距离为 3~5 m, 且二者通过 31 芯测井连接器相连, 引线资源有限; 另外, 井场环境还存在各种强电干扰。因此, 接口电路与井下仪器数据存储模块的通讯选用多点低电压差分信号 (M-LVDS) 来构建高速串行总线^[12-13]。

数据读取接口整体结构如图 1 所示。数据读取接口主要由运行于上位机的控制软件和接口电路两部分组成。其中, 硬件接口电路实现 BAR 数据存储模块数据输出接口和计算机接口的转换。控制软件实现数据读取过程的控制、数据存储、数据解编和数据回放。上位机通过 USB 总线控制数据读取接口板, 数据读取接口电路根据上位机命令通过基于 M-LVDS 的高速串行总线读取井下数据。

流检测电路、USB 总线控制器、FPGA 和高速总线驱动器等组成, 其结构如图 2 所示。其中, 电源管理电路实现将 USB 供电转换为数据读取接口电路内各电路所需要的低压电平, 如 3.3 V、1.2 V 等。另外, 电源管理电路将锂电池的输出升压转换为 15 V 输出, 给 BAR 主控短节内的数据存储模块供电。电流检测电路用于精确检测数据存储模块的供电电流。根据数据存储模块的供电电流可以对存储模块的故障进行初步判断。

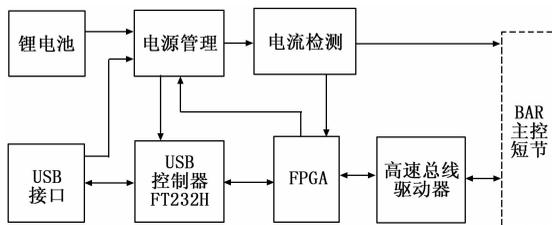


图 2 数据读取接口电路结构框图

USB 控制器实现数据读取接口电路和主机间的通讯, 本设计中选用 FTDI 公司的 FT232H^[14], 该芯片以内部固件实现了整个 USB 协议, 最高通讯速度可以达到 40 MB/s。本设计中将 FT232H 配置成 USB 转异步并行 FIFO 模式, 在此模式下, FT232H 内置一个双向 FIFO 接口, 通过读写标志信号和读写使能信号与 FPGA 进行通讯。

为了保证数据读取接口电路通讯的高效, 前端控制器采用 FPGA 芯片作为主控制芯片。本设计中 FPGA 实现数据编码、解码、校验、数据缓存、高速串行总线控制等。与微处理器 MCU 中指令顺序执行所不同的是, FPGA 中大量的门阵列可以实现复杂的并行逻辑控制功能, 可以以流水线的方式实现数据的编码、校验和缓存等, 提高总线响应的时效。以 FPGA 为控制核心也便于升级和扩展。

高速总线驱动器实现 TTL 电平和 M-LVDS 电平的转换。

3 数据读取接口电路软件设计

3.1 传输格式

井下仪器与数据读取电路的通讯和数据读取电路与上位机的通讯均采用相同的帧格式, 具体格式如图 3 所示。一个完整的通讯帧包括帧头、帧类型、帧内容和校验码。根据传输数据长度的不同将通讯帧分为两类, 一种是短帧, 总长度规定为 16 字节, 用于传输命令和井下仪器供电电流值等; 一种是长帧, 总长度固定为 2 048 字节, 仅用于传输井下仪器上传数据。

帧头	帧类型	帧内容	校验码
2B	1B	12B或2044B	1B

图 3 通讯帧格式

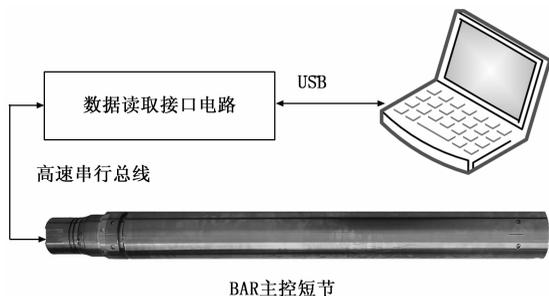


图 1 数据读取接口整体结构图

2 数据读取接口电路硬件设计

数据读取接口电路主要由锂电池、电源管理电路、电

3.2 控制逻辑设计

数据读取接口电路的软件是运行在 FPGA 内的逻辑电路, 采用 VHDL 语言进行设计, 图 4 为控制逻辑结构框图。FPGA 内的逻辑电路主要由 USB 并行接口、命令解析、下传命令集、8B/10B 编码、串行发送器、总线驱动控制器、串行接收器、10B/8B 解码、数据校验、数据缓存、上传命令集、供电管理、电流采集控制、电流缓存器等逻辑功能模块组成。

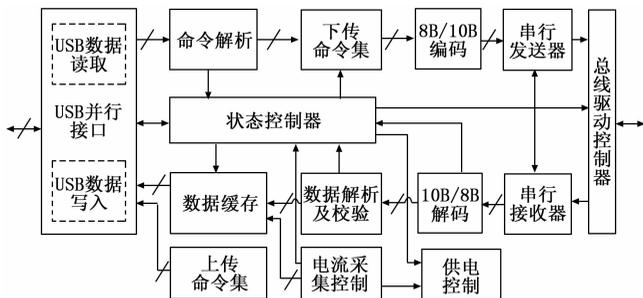


图 4 数据读取接口控制逻辑结构框图

USB 并行接口模块由 USB 数据读取功能模块和 USB 数据写入功能模块组成, 其中 USB 数据读取功能模块是根据 FT232H 的接收数据指示信号 RXF, 读取上位机发送到 FT23H 内部 FIFO 中的下传数据, 而后发送该数据到命令解析功能模块。USB 数据写入功能模块是跟据 FT232H 发送指示信号 TXF, 在状态控制器的控制下, 将选择缓存数据或电流测量值或命令集内的数据发送到 FT232H 中的发送 FIFO 中。

命令解析模块的功能是根据接收命令的内容产生相应的控制指示信号, 用于驱动状态控制器状态的转换, 并将需要下传的命令写入到下传命令集中。

下传命令集为数据读取接口电路下发到井下仪器主控短节的命令集合, 其包括两部分, 一部分是与井下仪器通讯的握手命令, 如下传数据请求命令、下传数据重发命令等, 该类命令以 ROM 形式固化在 FPGA 内; 另一部分是由数据读取接口电路转发给井下仪器的上位机命令, 缓存在 FPGA 内的双口 RAM 中。

数据读取接口电路与井下仪器主控短节通过差分串行总线通讯, 为提高数据传输的可靠性, 二者间的通讯采用了 8B/10B 编码方法。8B/10B 编码方法是通过冗余的 2 bits 实现传输的数据流中 ‘0’ 和 ‘1’ 的数量均等。该编码方法保证数据流中有足够的电平转换, 既可以实时校正串行接收电路的时钟漂移, 又可以保证直流平衡, 从而保证数据传输的高可靠性。另外, 额外的冗余编码还可以用于数据错误识别, 提高传输的校验能力。FPGA 是基于查找表结构, 且有大量的内部存储空间, 因此, 本设计中 8B/10B 编码和 10B/8B 解码模块均采用查表法实现, 在串行发送和接收时同步实现编码和解码, 提高传输效率。

数据解析及校验模块是根据数据传输协议的约定解析命令及校验接收到数据的正确性, 并将命令类型及校验结果通知状态控制器。本设计中采用 CRC-7 校验, 校验码采用查表方式获得, 可以在一个时钟周期内得到校验码, 从而可以与串行接收器及数据缓存器同步工作, 同步实现数据的接收、校验和缓存。

数据缓存模块主要用于缓存井下仪器上传数据和电流采集数据, 该数据缓存基于 FPGA 内的 SRAM 实现, 分为 3 个双端口 SRAM 区。其中电流采集数据缓存区占用一个 SRAM 区, 采用循环写入模式。井下仪器上传数据缓存区占用两个 SRAM 区, 采用乒乓结构。

上传命令集为数据读取电路发送到上位机的命令的集合, 该命令集以 ROM 形式固化在 FPGA 内。

状态控制器是数据读取接口电路的核心, 其根据上位机的下发命令、井下仪器上传数据状态和数据读取接口电路的状态, 产生相应的控制信号, 实现命令下发及命令和数据上传的功能。状态控制器主要由下传控制状态机和上传控制状态机组成。下传控制状态机主要包括供电设置态、下传命令态和设置上传命令态, 具体转换关系如图 5 (a) 所示, 其中, 设置上传命令状态的作用是产生驱动上传控制状态机状态转换的控制信号。上传控制状态机主要状态有上传电流值态、上传命令态和上传数据态, 具体转换关系如图 5 (b) 所示, 其中, 上传数据态包含等待子状态, 仅当数据传输完成后退出上传数据态。

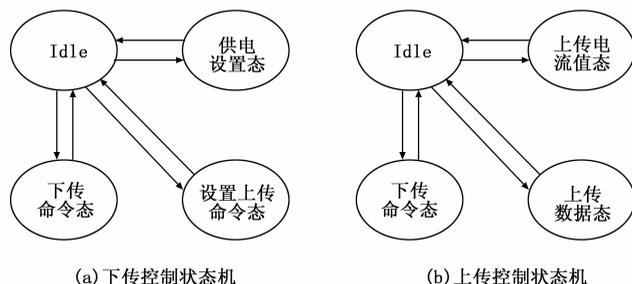


图 5 状态机控制器状态转换图

基于硬件描述语言设计的控制逻辑实现了上位机命令的解析、命令编码下传、上传数据同步接收、同步解码和校验等, 纯硬件逻辑使各部分同步协调工作, 可以实现高效的数据传输。图 6 为下传命令和上传数据的仿真波形图。图中, 数据读取电路在接收到上传数据后的 5 个时钟周期内开始发送下传命令, 可以看出纯逻辑电路响应高效迅速。

4 上位机软件设计

上位机软件的功能是通过下发命令控制数据读取接口电路读取井下仪器的测井数据、存储和回放测井数据并将测井数据转换为测井评价软件能识别的标准格式文件。

上位机软件基于 Visual Studio 2005 实现, 其组成结构如图 7 所示。控制软件主要由数据读取、电流监控、数据

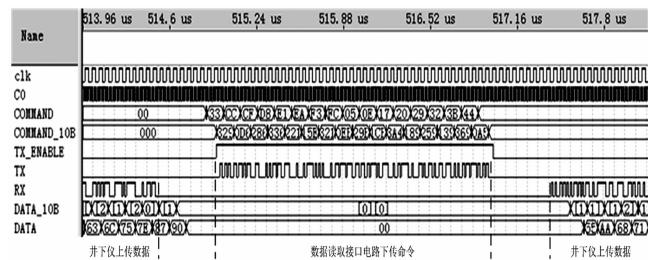


图 6 下传命令和上传数据仿真波形图

存储、文件转换和回放显示等功能模块组成, 以上功能模块均在独立的线程中实现。

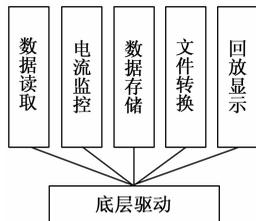


图 7 数据读取控制软件结构图

数据读取线程的主要功能是通过调用 D2XX 驱动程序控制数据读取电路与井下仪器数据存储模块进行通讯, 实现井下仪器数据的连续读取, 并将接收到的数据发送给数据存储线程。另外, 数据读取线程还负责控制清空井下仪器数据存储模块。

数据存储线程主要负责井下上传数据的重整、错误校正和存储。井下上传数据包括井下仪器工作状态信息和原始波形数据。数据存储线程将上传数据存储为原始数据文件, 同时提取仪器工作状态信息并以文本格式存储到一个独立的状态文件, 将声波波形数据以二进制格式存储到另一个独立的测井数据文件。

文件转换线程主要实现声波测井数据的增益还原、深度还原和标准格式的转换, 以提供符合各测井解释平台格式要求的测井数据文件。由于测井数据文件较大, 普通的 IO 文件操作方式效率较低下, 本设计中采用了内存映射文件方式实现测井数据文件的读取和标准格式文件的写入。

电流监控线程是在数据读取过程中定时读取和记录井下仪器数据存储模块的供电电流。通过井下仪器数据存储模块供电电流的异常, 可以初步预测井下仪器数据存储模块失效概率, 并为数据存储模块的失效分析提供支撑。

5 实验结果与分析

所研制的远探测声波测井仪数据读取接口已成功应用测井现场, 累计完成 8 口井的现场数据读取。在 BAR 测井仪的井下工作结束后, 仪器上提到井口, 利用该数据读取接口将测井数据快速读取到计算机中。自定义高速串行总线 (M-LVDS 总线) 实现数据读取接口与测井仪主控短节的通信, 原始测井数据以 80 Mbps 的速率传输到 FPGA 中

进行通讯协议的解编和校验。校验成功的数据由 USB 总线上传到测井计算机中, 由上位机软件进行回放。

图 8 为原始数据传输过程中高速串行总线波形图, 图中通道 1 为数据读取接口电路总线驱动的发送使能信号, 通道 3 为 M-LVDS+, 通道 2 为 M-LVDS-。从图中可以看出, 差分总线速率为 80 Mbps。在接收到上传数据后, 数据读取接口电路延时 350 ns 左右即启动命令下传。可以看出, 基于硬件逻辑的并行化协议管理方法保证了高速串行总线上下行的快速切换, 也保证串行总线的高速率。

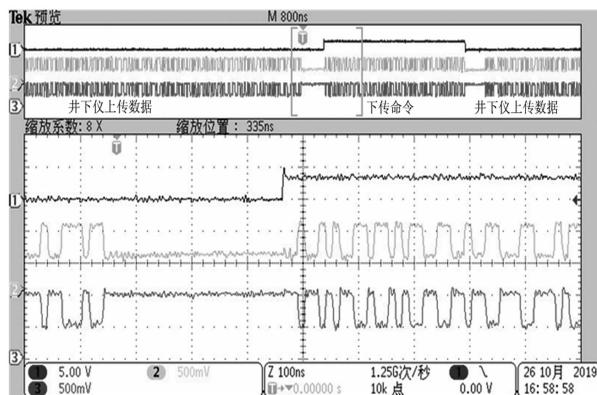


图 8 高速串行总线波形图

新疆塔里木油田某口井的测井数据为 720 MB, 读取时间为 101 s, 则平均读取速度达到了 57 Mbps, 略低于理论数据读取速率。经观测发现, 在某些时候井下数据存储模块在接收到数据请求命令后的响应存在不定延时。这主要是因为井下数据存储模块在读取数据过程中首先进行分块校验, 如果出现错误则需要根据冗余信息校正错误, 因此出现响应延时, 降低了整体数据读取速度。

图 9 为测井现场井口数据回放界面图。该次施工测井井段为 3 808.82~3 556.32 m, 波形数据质量良好。

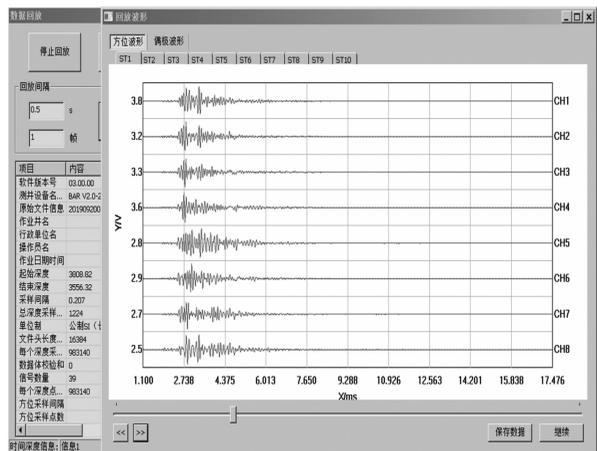


图 9 数据回放界面图

6 结束语

本文设计了一种基于 USB 总线和高速串行总线的测井

数据读取接口。本设计采用 FPGA 作为控制核心，基于硬件描述语言设计的控制逻辑实现了上位机命令的解析、命令编码下传、上传数据同步接收、同步解调和校验等，纯硬件逻辑使各部分同步协调工作，实现了高效的数据传输。经测试，该数据读取接口的平均数据读取速率达 57 Mbps，实现了测井数据的现场快速读取和回放，保证了测井数据检验的时效及测井施工的效率。

参考文献:

[1] 乔文孝, 鞠晓东, 车小花, 等. 从换能器技术的变化看声波测井技术的发展 [J]. 物理, 2011, 40 (2): 99-106.

[2] 唐晓明, 魏周拓. 声波测井技术的重要进展——偶极横波远探测测井 [J]. 应用声学, 2012, 31 (1): 10-17.

[3] 卢俊强, 鞠晓东, 乔文孝, 等. 多极子阵列声波测井系统设计及现场测试 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14 (26): 183-186.

[4] 车小花, 乔文孝, 鞠晓东. 相控圆弧阵声波辐射器在井旁地层中产生的声场特征 [J]. 石油学报, 2010, 31 (2): 343-346.

[5] 乔文孝, 鞠晓东, 车小花. 可用于声波测井的相控圆弧阵声波辐射器 [J]. 测井技术, 2009, 33 (1): 22-25.

[14] VYKINTAS M, ALGIRDAS M. Recognition of normal-abnormal phonocardiographic signals using deep convolutional neural networks and Mel-frequency spectral coefficients [J]. Physiological measurement, 2017, 38 (8): 1671-1684.

[15] 谭朝文, 王威廉, 宗容, 等. 基于卷积神经网络的先心病心音信号分类算法 [J]. 生物医学工程学杂志, 2019, 36 (5): 728-736, 744.

[16] RUBIN J, ABREU R, GANGULI A, et al. Classifying heart sound recordings using deep convolutional neural networks and Mel-frequency cepstral coefficients [C] // 2016 Computing in Cardiology Conference (CinC), IEEE, 2017: 813-816.

[17] NILANON T, PURUSHOTHAM S, LIU Y. Normal / abnormal heart sound recordings classification using convolutional neural network [C] // 2016 Computing in Cardiology Conference, IEEE, 2017.

[18] 许春冬, 辛鹏丽, 周静, 等. 基于功率谱密度与卷积神经网络的心音分类 [OL]. [2020-07-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20200529.1454.006.html>.

[19] POTES C, PARVANEH S, RAHMAN A, et al. Ensemble of feature-based and deep learning-based classifiers for detection of abnormal heart sounds [C] //2016 Computing in Cardiology Conference (CinC), IEEE, 2017.

[20] 李伟, 杨向东, 陈恩. 基于 CNN 和 RNN 联合网络的心音自动分类 [J]. 计算机工程与设计, 2020, 41 (1): 46-51.

[21] XIAO B, XU Y Q, BI X L, et al. Heart sounds classification using a novel 1-D convolutional neural network with extremely low parameter consumption [J]. Neurocomputing, 2020,

[6] 乔文孝, 车小花, 鞠晓东, 等. 声波测井相控圆弧阵及其辐射指向性 [J]. 地球物理学报, 2008 (3): 939-946.

[7] 李国英, 柴细元, 鞠晓东, 等. 方位远探测反射声波成像测井仪器 [J]. 测井技术, 2018, 42 (2): 221-226.

[8] 刘先平, 柴细元, 鞠晓东, 等. 方位远探测声波反射波成像测井仪研制与应用 [J]. 测控技术, 2018, 37 (3): 134-137.

[9] 陈文轩, 裴彬彬, 赵帅, 等. 基于以太网技术的网络化测井系统研究 [J]. 测井技术, 2012, 36 (3): 286-289.

[10] 肖加奇, 陈文轩, 白庆杰, 等. 新一代网络化测井系统 LEAP800 [J]. 石油仪器, 2012, 26 (1): 26-29.

[11] 柴细元, 鞠晓东, 刘先平, 等. 用于电缆测井的海量数据井下存储方法: 中国, 201710690773.0 [P]. 2018-01-09.

[12] 李华洲. 基于物联网的室内设备监管系统设计 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (3): 31-33.

[13] 王景忠, 王俊芳, 于立佳, 等. 以太网供电 PoE 技术的研究与实现 [J]. 无线电工程, 2012, 42 (11): 44-47.

[14] Future Technology Devices International Ltd. FT232H single channel hi-speed USB to multipurpose UART/FIFO IC-Datasheet [EB/OL]. (2019-05-27) [2019-109-1]. https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232H.pdf.

[22] DAVIS S, MERMELSTEIN P, et al. Comparison of parametric representations for monosyllabic word recognition in continuously spoken sentences [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing, 1980, 28 (4): 357-366.

[23] FURUI S. Cepstral analysis technique for automatic speaker verification [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing, 1981, 29 (2): 254-272.

[24] CHAUHAN S, WANG P, LIM C S, et al. A computer-aided MFCC-based HMM system for automatic auscultation [J]. Computers in Biology & Medicine, 2008, 38 (2): 221-233.

[25] 谭朝文, 王威廉, 宗容, 等. 卷积神经网络应用于先心病心音信号分类研究 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55 (12): 174-180.

[26] KRIZHEVSKY, ALEX, SUTSKEVER, et al. ImageNet classification with deep convolutional neural networks [J]. Communications of the ACM, 2017, 60 (6): 84-90.

[27] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition [C] //IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition, IEEE Computer Society, 2016: 770-778.

[28] HUANG G, LIU Z, LAURENS V D M, et al. Densely Connected Convolutional Networks [C] //Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 4700-4708.

[29] LIU C Y, SPRINGER D, LI Q, et al, et al. An open access database for the evaluation of heart sound algorithms [J]. Physiological Measurement, 2016, 37 (12): 2181-2213.