

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2019016

随钻一体化测井仪平台开发

朱祖扬^{1,2}, 倪卫宁^{1,2}, 张 卫^{1,2}, 米金泰^{1,2}, 郑奕挺^{1,2}

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要: 为了满足多深度探测评价钻井液侵入和识别地层岩性的需要, 开发了具有电阻率、伽马等多参数测量功能的随钻一体化测井仪平台。基于相移电阻率、衰减电阻率、总量伽马和成像伽马等测量方法, 采用六发两收的八线圈系设计方案, 挂接了伽马探管、加速度计和磁通门等传感器, 同时采用了由发射电路、接收电路和控制电路组成的模块化电路设计方案, 并定义了总线通讯协议, 建立起了各功能模块之间的信息传递。开发了测井仪平台的固件程序, 不仅能够测量相移电阻率和衰减电阻率数据, 还能够测量伽马数据和地层方位信息; 开发了平台测试软件, 能够对仪器进行标定测试及下井前的启动设置, 实现仪器控制指令的下发, 测量数据的上传, 并对电阻率、伽马、井斜角和工具面等数据进行监测和图形化处理。研制的随钻一体化测井仪平台可以为大斜度井和水平井钻并提供丰富的、高质量的测井数据, 为地层评价提供所需要的数据, 从而为非常规油气储层开发提供技术支持。

关键词: 随钻测井; 一体化; 固件程序; 电阻率; 伽马

中图分类号: TE927

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2019)01-0118-09

The Development of an Integrated Logging Instrument Platform while Drilling

ZHU Zuyang^{1,2}, NI Weining^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, MI Jintai^{1,2}, ZHENG Yiting^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 100101, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: The goals were to detect characteristics of multi-depth formations and evaluate mud intrusion as well as identify the formation lithology. To that end, researchers developed an integrated logging instrument platform while drilling capable of multi-parameter measurement such as resistivity and Gamma. According to the measurement methods like phase shift resistivity, attenuation resistivity, total Gamma and imaging Gamma, an eight-coil design (six senders and two receivers) was adopted, and the sensors such as Gamma probes, accelerometers, and fluxgates were attached. Meanwhile, the modular circuit design scheme consisting of transmitting circuit, receiving circuit and control circuit was applied. Researchers then defined the bus communication protocol to establish the information transmission among various functional modules. The firmware program for the logging instrument platform has been developed, which can not only measures the phase shift resistivity and attenuation resistivity data, but also measure the Gamma data and formation azimuth information. The test software for the platform has been developed to calibrate the instrument and enable the startup setting prior to running in hole, realize the issuing of control commands and upload the measurement data, and monitor and graphically process data such as resistivity, Gamma, inclination angle, and tool face. This integrated logging instrument platform could provide abundant high-quality logging data for high-angle well and horizontal well drilling, and acquire necessary data for formation evaluation, so as to provide technical support and best practices for the development of unconventional oil and gas reservoirs.

Key words: logging while drilling; integration; firmware program; resistivity; gamma

随着油气勘探开发的深入, 特别是复杂油气藏、非常规油气藏的勘探开发, 对随钻地质导向的需求越来越大, 目前大多数随钻地质导向测井都包含自然伽马探测和电阻率探测, 在实际应用过程中随钻伽马测井仪和随钻电阻率测井仪几乎成为标配的仪器^[1-3]。国外随钻伽马测井仪^[4-7]已经

收稿日期: 2018-06-29; 改回日期: 2018-12-03。

作者简介: 朱祖扬(1981—), 男, 江西南昌人, 2004年毕业于云南大学地球物理专业, 2007年获中国地震局固体地球物理专业硕士学位, 2011年获中国科学院声学专业博士学位, 副研究员, 主要从事随钻测量仪器研发工作。E-mail: zhuzuyang_2001@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“低渗透储层高精度随钻成像技术研究”(编号: 2016ZX05021-002)资助。

形成了系列化产品,例如, Schlumberger 公司 MWD/LWD 仪器中测量自然伽马的有 EcoScope、GeoVision、PeriScope、ArcVision、SlimPulse 和 IPZIG, Halliburton 公司的随钻伽马测井仪有 GABI、AGR、ABG 及 DGR 等,其中 GABI、AGR 和 ABG 可以提供方位伽马成像。随钻电阻率测井仪^[8-9]出现的时间比随钻伽马测井仪早,先后研发了不同外径的测井仪,如 Schlumberger 公司的 ARC475、Halliburton 公司的 EWR 和 Baker Hughes 公司的 MPR 等,这些测井仪器主要在钻铤直径、工作频率、收发线圈个数和间距等方面有所区别。国内通过技术引进、应用和研发,随钻测井技术取得了较大进步。中油测井公司从 Halliburton 公司引进了第一套 MWD/LWD 仪器,经过技术消化和吸收,研制了自己的随钻测量仪器;中国石油集团钻井工程技术研究院研制出了 CGDS-I 钻井系统,可以实时测量近钻头电阻率、方位电阻率、自然伽马、近钻头井斜角和工具面等数据;中国石化研制出了具有自主知识产权的随钻自然伽马测量仪和近钻头方位伽马测量仪。

从现场应用来看,多功能随钻测井仪不仅可以降低仪器的生产成本、简化钻具组合,还可以降低钻井风险, Baker Hughes 公司研制的 OnTrak 仪器可以测量电磁波电阻率、方位伽马、环空压力和温度等参数;目前,国内还没有开展这方面的研究。基于上述需求,笔者将常用的电磁波电阻率测井仪和伽马测井仪集成到一个短节,开展了随钻一体化测井仪集成平台的研究,统一了 2 种仪器的发射电路、接收电路和中央控制电路,统一了数据协议和

通讯方式,一次下钻便能测量电阻率和伽马数据,并能够对地层进行多深度探测,可以为大斜度井和水平井的地质导向钻井提供技术支持。

1 随钻测井仪平台研发

随钻一体化测井仪包括天线设计、伽马探测器设计、钻铤骨架设计和硬件电路平台开发,由于前 3 部分主要是天线安装、传感器模块安装和钻铤本体加工,技术已经成熟,在此不展开介绍。硬件电路平台集成了常规随钻电磁波电阻率^[10-12]和随钻伽马测井仪的基本功能,不仅可以测量电阻率和伽马数据,也可以测量井斜角和方位角。硬件电路包括中央控制电路、发射电路和接收电路,传感器包括伽马探管、加速度计和磁通门,电磁波电阻率的测量由 6 个发射线圈(3 个上发射线圈和 3 个下发射线圈)和 2 个接收线圈实现,如图 1 所示。发射电路产生的控制信号经过驱动电路和调谐电路后驱动发射线圈发射电磁波信号,接收电路把接收线圈的电压信号进行放大、调理和采集,中央控制电路统一负责控制发射、接收电路的工作时序,并进行数据后处理。该硬件电路还提供 2 路 RS485 通讯接口,第一路 RS485 通讯接口设置了较高的通讯速率,负责硬件平台和上位机软件平台(Toolgo)的联系,例如设置硬件的 RTC 时间和下载 Flash 数据;第二路 RS485 通讯接口设置了较低的通讯速率,负责硬件平台与 MWD 仪器的联系,实时传输伽马、电阻率、井斜角和方位角等数据。

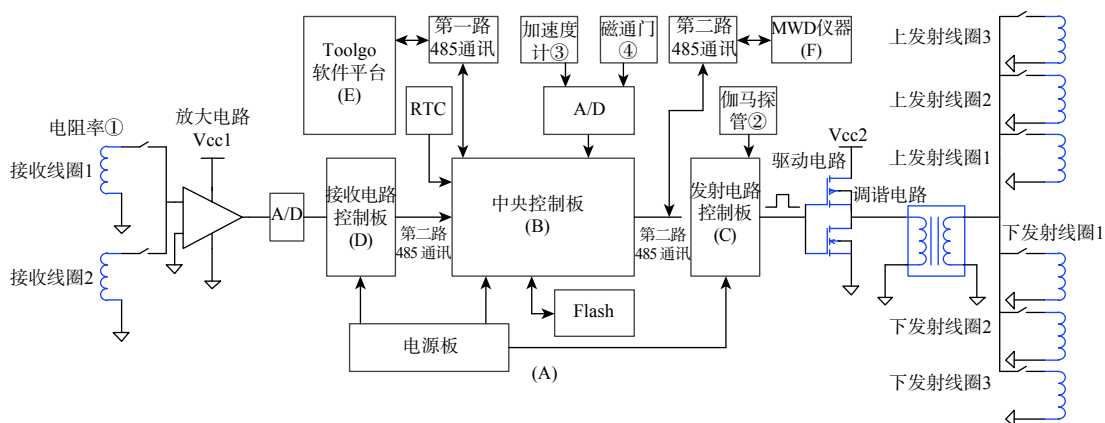


图 1 硬件电路平台

Fig.1 Hardware circuit platform

根据该平台的设计要求,需要开发相应的固件程序和测试软件,以实现以下功能:1)仪器基本参

数的配置,时钟同步和实时监测;2)大容量存储器数据的下载;3)加速度计和磁通门测量数据的提

取,计算井斜角和方位角;4)电磁波波形、相移电阻率和衰减电阻率的提取;5)伽马测量数据的提取,多扇区成像图处理。

2 数据协议定义

中央控制电路不仅要管理发射电路和接收电路,还要与上位机软件平台、MWD 仪器通信,需要执行的指令多达几十条甚至高达一百多条,因此有必要建立底层数据协议。

2.1 仪器和功能操作的定义

数据协议的一项重要内容就是定义仪器和功能操作的身份代号,主要有4类:1)随钻测井仪和设备代号,在图1中用(A)~(F)标出了仪器、设备的位置;2)测量参数代号,测量参数包括电阻率、伽马、加速度和磁通量,每个测量参数又包含了开始和停止提取测量参数2个操作,因此均有2个操作代号,在图1中用①~④标出了各个测量传感器的位置;3)功能操作代号,功能操作包括仪器时钟同步、时钟信息实时更新、存储器数据下载、存储器数据擦除和仪器版本号获取等相关操作,如表1所示。

表1 仪器和操作代号定义

Table 1 Definition of instrument and operation codes

序号	标号	分类	平台参数	代号
1	(A)	仪器和设备	随钻一体化测井仪	X1
2	(B)		中央控制电路板	X2
3	(C)		发射电路板	X3
4	(D)		接收电路板	X4
5	(E)		软件平台(PC机)	X5
6	(F)		MWD 仪器	X6
7	①	测量参数	电阻率	X7/X8
8	②		伽马	X9/X10
9	③		加速度	X11/X12
10	④		磁通量	X13/X14
11		功能操作	RTC 同步/更新	X15/X16
12			Flash 数据下载/擦除	X17/X18
13			控制板版本号	X19
14			接收板版本号	X20
15			发射板版本号	X21
16			PC 机确认信息	X22

2.2 数据通讯方式定义

数据通讯包含发送指令数据包和接收反馈数据包,每帧数据包含有【命令头】、【信息】和【校验和】等3部分,【命令头】由4个字节组成,前3个字节分别表示3支仪器或者设备地址的代号,第4个字节表示要发送的数据长度,等于【信息】长度和【校验和】长度之和,【信息】包括测量参数、波形、时间和仪器信息等数据,【校验和】是2个字节的数据,采用了循环冗余校验码(CRC)生成校验和数据。每帧数据格式定义如图2所示,例如【命令头】X1、X2、X5、08,表示该仪器是一体化测井仪,发送数据的目标地址是中央控制电路,该数据发自计算机,要发送的数据长度是8个字节,【信息】18、06、12、09、37、20,信息长度是6个字节,【校验和】是48、71的2个字节,表示校验和为0×4871(十六进制表示)。



图2 一帧数据格式定义

Fig. 2 Definition of one-frame data format

3 固件程序和测试软件开发

3.1 数据的采集原理

硬件电路负责采集和存储原始数据,这些数据包括伽马值、电阻率、加速度和磁通量等测量数据,还存储了时钟等信息。电阻率的测量过程较为复杂,发射电路需要选择发射线圈和发射频率,接收电路采集完数据以后,需要将线圈距、频率、增益等参数连同采集的数据发送给中央控制电路,中央控制电路把这些未经处理的原始数据实时存储到Flash芯片,并在这些数据打上时间标签。中央控制电路依次发送指令给发射电路和接收电路,通过执行指令获取电阻率数据。中央控制电路发送如表2所示的12条指令,才能使所有的发射线圈工作,并发射不同频率的电磁波信号。发射线圈控制命令格式,频率代号有2种,F2表示500 kHz,F3表示2 MHz;线圈位置代号有6种,S1表示近距离上部线圈,S2表示近距离下部线圈,S3表示中距离上部线圈,S4表示中距离下部线圈,S5表示远距离上部线圈,S6表示远距离下部线圈。

接收电路采集到的数据通过第二路 RS485 总线发送到中央控制电路(或 MWD 仪器), 发送的数据包含幅度衰减、相位差数据和波形数据, 其中幅度衰减、相位差数据标识符为 P1, 波形数据标识符为 P2, 这 2 种数据的长度标识符分别为 L1 和 L2。发送的数据里还包含线圈距、频率设置、增益设置和校验码。每一帧数据的最后 2 个字节为设置的校验

码, 这就为发送设备和接收设备之间的数据通讯提供了保障。发送设备每发送一包数据, 都要计算一次 CRC 校验码, 并将该计算结果和数据一起发送给接收方, 接收设备接收到数据再计算一次 CRC 校验码, 并将该计算结果和发送的 CRC 校验码进行比较, 如果二者相等, 说明发送设备和接收设备之间的数据通讯没有错误。

表 2 发射板数据格式
Table 2 Data format of transmitting circuit

序号	命令头	操作	含义
1	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7	F2 S1	选择发射频率 500 kHz, 近距离上部线圈发射
2	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7	F2 S2	选择发射频率 500 kHz, 近距离下部线圈发射
3	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7	F2 S3	选择发射频率 500 kHz, 中距离上部线圈发射
4	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7	F2 S4	选择发射频率 500 kHz, 中距离下部线圈发射
5	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7	F2 S5	选择发射频率 500 kHz, 远距离上部线圈发射
6	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7	F2 S6	选择发射频率 500 kHz, 远距离下部线圈发射
7	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7	F3 S1	选择发射频率 2 MHz, 近距离上部线圈发射
8	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7	F3 S2	选择发射频率 2 MHz, 近距离下部线圈发射
9	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7	F3 S3	选择发射频率 2 MHz, 中距离上部线圈发射
10	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7	F3 S4	选择发射频率 2 MHz, 中距离下部线圈发射
11	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7	F3 S5	选择发射频率 2 MHz, 远距离上部线圈发射
12	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7	F3 S6	选择发射频率 2 MHz, 远距离下部线圈发射

3.2 数据的发送和接收

固件程序实现了 CRC 码的计算、串口的连接和数据的发送等操作, 这些操作能够满足中央控制电路和其他设备之间的数据通讯, 从而对其他设备进行管理, 实时发送监测数据。每帧数据的发送和接收流程如图 3 所示, 原始数据包括时钟信息、伽马值、电阻率的幅度衰减和相位差等数据, 用到了 3 个函数, 一个是生成校验码函数, 一个是串口通讯(包括串口发送、串口接收)函数, 还有一个是发送指令函数, 包括了 CRC 码的计算、串口的连接和数据的发送等操作。

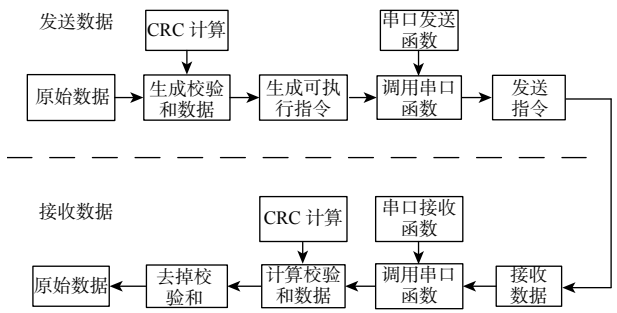


图 3 发送和接收数据的流程
Fig. 3 Process of sending and receiving data

3.3 数据的图形化处理

随钻一体化测井仪平台提供了 2 种数据处理方式: 1) 仪器处于标定测试阶段, 需要实时监测各类测量数据, 及时掌握仪器的工作性能和修正仪器的工作参数; 2) 钻井过程中, 井下一些基本测量数据通过钻井液脉冲等传输方式上传至地面, 同时所有测量数据和成像数据实时存储到 Flash 芯片上。仪器的这种多样化工作模式决定了硬件电路和上位机软件之间有不同的数据处理流程, 即硬件电路负责采集数据、存储数据和转发数据, 而上位机软件负责接收数据、处理数据和分析数据。当硬件电路和上位机软件建立起通讯后产生数据流。硬件电路对数据流实时存储, 存储的数据是原始的数据, 包含命令头和校验和等信息。上位机软件按照通讯协议解读数据流, 提取出电阻率、伽马值、加速度和磁通量等测量数据, 并将测量数据图形化, 图形化流程如图 4 所示。图形化即绘制出电阻率、加速度和磁通量数据曲线, 根据伽马绘制图像。测量数据图形化使用了 MoveTo、LineTo、FillSolidRect 和 BitBlt 等绘图函数, 利用 MoveTo 和 LineTo 函数绘制直线, 利用 FillSolidRect 函数绘制矩形并填充颜色, 利用 BitBlt 函数将内存中的图像复制到屏幕上。

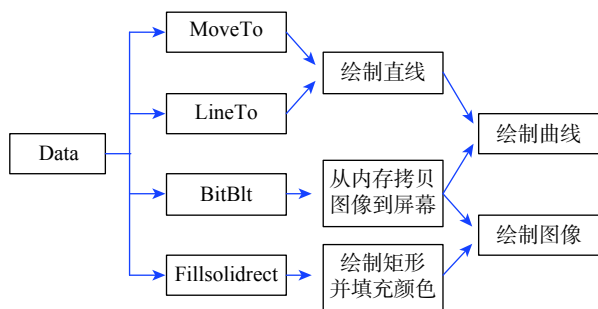


图4 数据图形化流程

Fig. 4 Data graphics processing flow

3.3.1 绘制曲线算法

以绘制电阻率曲线为例,当硬件电路持续不断给上位机软件发送数据流 $Val(j)$ 时,上位机软件首先检测 j 的值,依据此值选择画线通道 j ,并把数据流依次赋值给该通道数组 $ch[12][256]$,表达式为 $ch[j][255]=Val(j)$ 。每接收一个电阻率数据,通道数组就从后向前移动一个数据,然后把新接收到的电阻率数据赋给通道数组的尾部。通道数组赋值后,在画图窗口利用 $MoveTo$ 函数和 $LineTo$ 函数绘制 $ch[j][256]$ 的一共256个数据的曲线,绘制电阻率曲线的流程如图5所示。

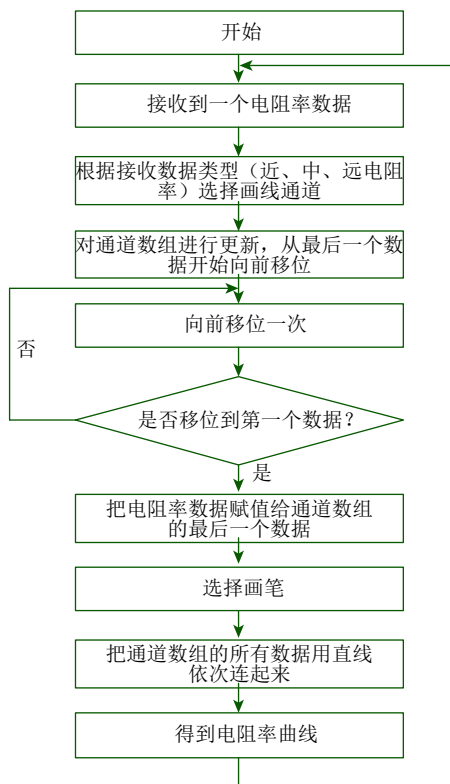


图5 绘制电阻率曲线的流程

Fig. 5 Flow of resistivity curve drawing

3.3.2 成像算法

以伽马成像图为例,当硬件电路持续不断给上位机软件发送数据流 $Gam[8]$ 时,上位机软件把这8个数据赋值给扇区数组 $Sec[8][256]$,表达式为 $Sec[8][255]=Gam[8]$ 。每接收一组伽马数据,扇区数组就从后向前移动一行数据,然后把新的一组伽马数据赋给扇区数组的最后行。由于伽马数据是一组0~300数值的数据,而不是RGB颜色值,因此需要把伽马数据转换为颜色值,直接的办法就是查表,把伽马数据作为索引值,获得相应的RGB颜色值,如表3所示。扇区数组赋完值后,然后根据伽马数据进行查表,把 $Sec[8][256]$ 转换为3个扇区数组 $Sec_r[8][256]$, $Sec_g[8][256]$, $Sec_b[8][256]$,分别对应RGB的3个颜色值。在画图窗口用 $FillSolidRect$ 函数绘制 8×256 个方块,每个方块用对应扇区数组 Sec_r , Sec_g 和 Sec_b 代表的颜色值进行填充,然后用 $BitBlt$ 函数从将内存中的图像复制到屏幕上,伽马成像的流程如图6所示。

表3 索引值表

Table 3 Index value table

索引值	RGB		
	R	G	B
0	250	255	179
1	250	254	176
2	250	253	173
...
298	77	40	6
299	76	39	6
300	75	38	6

4 开发实例

随钻一体化测井仪下井前必须进行仪器时钟同步,时间信息将和测量的数据一起实时存储,时间信息准确与否直接关系到时深转换的精度。井下随钻一体化测井仪进行伽马、电阻率、加速度和磁通量等数据的采集和实时存储,对于刻度井这些数据要实时上传到地面进行分析。测井结束后或者由于钻井原因(例如更换钻头)中途起钻,随钻一体化测井仪要从井眼里取出,在地面下载数据。因此时钟同步、数据下载、伽马和电阻率数据操作是十分重要的工作,加速度和磁通量等数据也同样重要,并

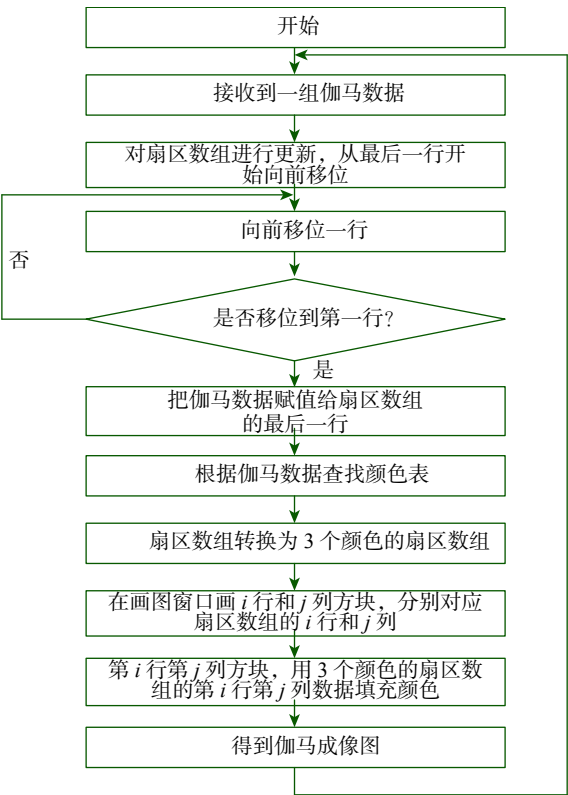


图 6 伽马成像流程
Fig. 6 Flow of Gamma imaging

斜角和工具面的计算需要用到这些数据,从固件程序开发角度而言,这些数据的处理过程和电阻率数据的处理过程是一样的,因此在下面不再作介绍。

4.1 时钟同步和更新

中央控制电路时钟同步和更新流程如图 7 所示。固件程序初始化时,会给时钟设定一个初始时间,包括年月时分秒和毫秒数据,这个初始时间只是一个参考时间,并不能直接用于时间信息计算。时钟同步就是通过外部设备(例如计算机)输入正确的时钟数据,更新电路上的时钟数据,从而使电路时钟和外部设备时钟同步。例如当前时间是 2018 年 6 月 20 日(星期三)10 时 4 分 5 秒 30 毫秒,外部设备一共输入 9 个字节的数据,其中年占 2 个字节,其他的各占 1 个字节,这 9 个字节是 14 12 06 14 03 0A 04 05 1E,最终外部设备(计算机)发送给中央控制电路的时钟同步命令是: X1 X2 X5 0C X15 14 12 06 14 03 0A 04 05 1E AA F7,前 4 个字节是命令头,第 5 个字节(X15)是时钟同步操作代号,中央控制电路接收到这条指令后立即同步本地时钟。

外部设备(计算机)给中央控制电路时钟发送更新命令: X1 X2 X5 03 X16 d7 E1,中央控制电路接收

到后立即向外部设备(PC 机)发送本地时钟数据: X1 X5 X2 08 X22 X16 1B F3 E1 54 FC 07。时钟数据前 4 个字节是命令头,第 5 个字节(X22)是计算机的确认信息,第 6 个字节(X16)是时钟更新操作代号,第 7 至第 10 个字节是时钟信息,即 1BF3E154,写成二进制格式为 00011011 11110011 11100001 01010100,一共是 32 位,低 1 位至低 5 位 10100 表示天,低 6 位至低 10 位 01010 表示时,低 11 位至低 16 位 111000 表示分,低 17 位至低 22 位 110011 表示秒,低 23 位至低 32 位 0001101111 表示毫秒,因此发送的时钟数据是 20 日 10 时 56 分 51 秒 111 毫秒。

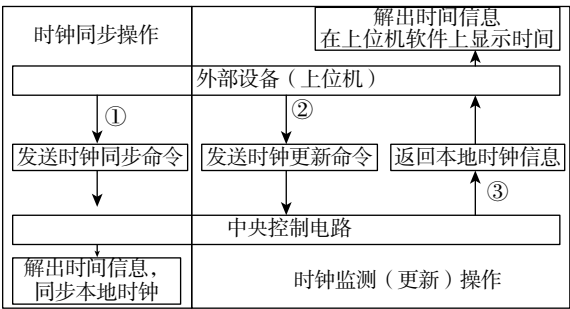


图 7 时钟同步和更新流程
Fig. 7 Clock synchronization and update process

4.2 数据快速下载

中央控制电路遵循“即采即存”的原则,采集完一次数据,立即存入到 Flash 芯片。每片 Flash 芯片有 2 048 个数据块,每个数据块有 128 个数据页,每个数据页有 4 096 个字节的数据,因此总共能存储 1G 字节数据。数据存储格式是先存 4 个字节的时间信息,再存 4 个字节的数据类型,最后存储数据信息(包括 2 个字节的校验码)。从 Flash 提取数据是以页为单位,Flash 实际存储多少页,则向外发送多少页的数据,数据快速下载流程如图 8 所示。

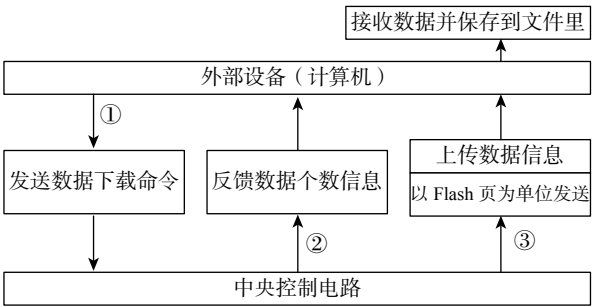


图 8 数据快速下载流程
Fig. 8 Data fast download process

外部设备(计算机)向中央控制电路发送命令: X1 X2 X5 03 X17 1B E0, 中央控制电路从 Flash 起始页开始发送数据到外部设备(计算机)。外部设备(计算机)收到反馈命令: X1 X5 X2 08 X22 X17 00 00 08 BE F7 FE, 反馈命令的前 4 个字节是命令头, 第 5 个字节(X22)是计算机确认信息, 第 6 个字节(X17)是 Flash 数据下载操作代号, 第 7 至第 10 个字节是下载数据的数量, 一共是 2 238(0×000008BE)个数据, 在该条命令后面会连续收到 2 238 个数据。如果 Flash 是满页存储数据, 即存了 1 G 的数据, 外部设备(计算机)通过 RS485 串口接收(波特率 115.2 kb/s)这些数据至少要用时 2 h, 如果考虑数据要进行中间处理(例如拷贝和保存文件), 接收这些数据所用时间可达 10 h 以上。因此外部设备(计算机)在接收数据过程中要尽量一次接收多个(例如 30 000)字节的数据, 然后再打包保存到文件中, 以减少中间操作次数。

4.3 电阻率曲线处理

随钻一体化测井仪使用了 6 个发射线圈和 2 个接收线圈来发射、接收电磁波信号, 按照接收源距和发射频率划分为 12 条电阻率曲线, 能够提供不同探测深度的相位差和幅度衰减数据^[13-15], 从而满足地质导向和地质评价需求, 具体电阻率曲线类型如表 4 所示。

例如, 中央控制电路向发射电路发送命令: A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 F2 S1, 发射电路选择 500 kHz 的频率信号和近距离上部线圈发射电磁波信号, 接收

表 4 接收电阻率曲线类型

Table 4 The types of receiving resistivity curves

编号	接收数据类型
1	近距离 500 kHz 频率发射得到的电磁波幅度衰减
2	近距离 2 MHz 频率发射得到的电磁波幅度衰减
3	近距离 500 kHz 频率发射得到的电磁波相位差
4	近距离 2 MHz 频率发射得到的电磁波相位差
5	中距离 500 kHz 频率发射得到的电磁波幅度衰减
6	中距离 2 MHz 频率发射得到的电磁波幅度衰减
7	中距离 500 kHz 频率发射得到的电磁波相位差
8	中距离 2 MHz 频率发射得到的电磁波相位差
9	远距离 500 kHz 频率发射得到的电磁波幅度衰减
10	远距离 2 MHz 频率发射得到的电磁波幅度衰减
11	远距离 500 kHz 频率发射得到的电磁波相位差
12	远距离 2 MHz 频率发射得到的电磁波相位差

电路采集 2 个接收线圈接收到的电磁波信号。接收电路计算电磁波相位差和幅度衰减, 实时存储波形数据、相位差和幅度衰减数据, 同时通过数据总线向外发送这些数据。中央控制电路向外部设备(计算机)发送从接收电路接收到的波形数据, 外部设备(计算机)在软件平台上实时绘制电磁波的波形, 如图 9 所示。从图 9 可以看出, 相同源距时 500 kHz 信号的峰峰值要大于 2 MHz 信号的峰峰值, 相同频率时远源距信号的峰峰值要小于中源距信号的峰峰值。

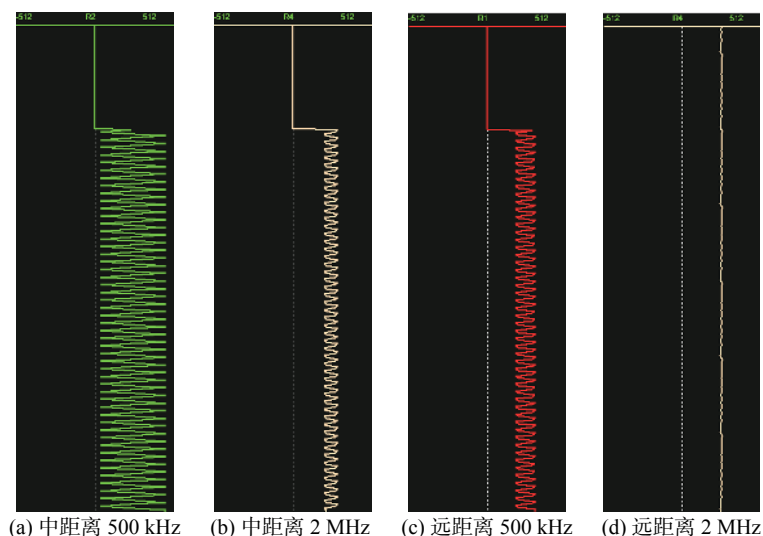


图 9 电磁波的波形

Fig.9 Waveform of electromagnetic wave

4.4 伽马成像数据的处理

伽马成像数据是通过伽马探管在8个扇区进行计数获得,这些数据按方位角展开在一张成像图上。对伽马成像图进行插值处理,通过线性插值把8个扇区的数据拓展到64个扇区,从而使伽马成像图平滑连续。如果外部设备(计算机)向中央控制电路发送命令: X1 X2 X5 03 X9 DD E1, 中央控制电路首先返回一条确认指令: X1 X5 X2 08 X22 X9 00 00 00 00 86 98, 确认指令的前4个字节是命令头,第5个字节(X22)是计算机确认信息,第6个字节(X9)是伽马监测操作代号,第7至第10个字节(0×00 0×00 0×00 0×00)是保留位。然后中央控制电路向外部设备(计算机)每隔1s发送一次8个扇区的伽马数据,软件平台通过成像算法对伽马数据成像。

伽马成像图插值方法有线性插值和双曲线插值等方法,线性插值方法简单但成像精度较低,双曲线插值方法复杂但成像精度较高。笔者采用线性插值方法,每2个伽马数据之间插入8个点。例如,8个伽马数据分别是 $b[k]$, $0 \leq k \leq 7$, 则插值后的数据是:

$$\begin{cases} c[k+9i] = b[0+i] + k(b[1+i] - b[0+i]) \\ 0 \leq k \leq 8, 0 \leq i \leq 6 \\ c[63] = b[7] \end{cases} \quad (1)$$

每个成像图横轴是扇区数,纵轴是深度,软件平台实现了8个扇区伽马数据的成像处理,插值前的成像图效果较差,扇区之间的图形分界线很明显,插值后的成像图效果较好,扇区之间图形平滑连续(见图10)。

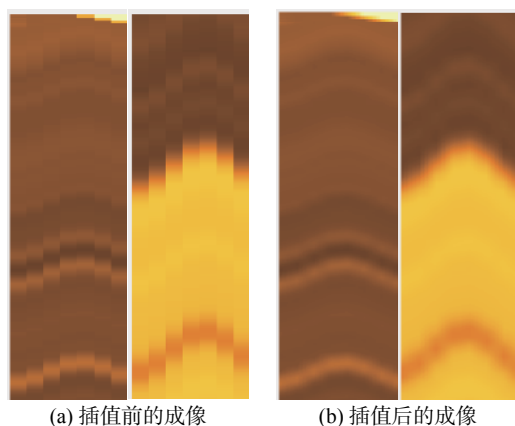


图10 伽马成像图

Fig. 10 Gamma imaging

5 结论与建议

1) 随钻一体化测井仪不仅能够测量地层的伽马

值,还能够测量地层的电阻率,能够应用于地质导向钻井,相较于常规随钻伽马和随钻电磁波电阻率测井仪,不仅降低了仪器生产成本,而且提高了仪器施工效率。

2) 在现有随钻测井仪的硬件平台基础上,改进了固件程序功能,重新定义了底层数据协议和数据通讯方式,能够处理各种指令,计算和快速存储加速度、磁通量、伽马和电阻率等测量数据,并在接收到外部设备发送的命令后,能够转发计算结果。

3) 开发的上位机测试软件和固件程序执行相同的数据协议,能够控制硬件平台,同步电路时钟和实时监测时间信息,快速下载Flash芯片存储的数据,提取(伽马、电阻率等)测量数据和进行图形化处理,监控仪器工作状态。

4) 随钻一体化测井仪的固件程序和上位机测试软件已经通过了调零等多种功能的测试,达到了下井试验的要求。为了进一步评价整套仪器的综合性能,建议开展不同油区、不同井型的现场试验,尽快实现该套仪器的产业化生产和应用。

参 考 文 献

References

- [1] 秦绪英,肖立志,索佰峰. 随钻测井技术最新进展及其应用[J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(4): 313-322.
QIN Xuying, XIAO Lizhi, SUO Baifeng. The development of logging while drilling and its application[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2003, 26(4): 313-322.
- [2] 张辛耘,王敬农,郭彦军. 随钻测井技术进展和发展趋势[J]. 测井技术, 2006, 30(1): 10-15.
ZHANG Xinyun, WANG Jingnong, GUO Yanjun. Advances and trends in logging while drilling technology[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(1): 10-15.
- [3] 赵平,郭永旭,张秋海. 随钻测井技术新进展[J]. 国外测井技术, 2013, 34(2): 7-17.
ZHAO Ping, GUO Yongxu, ZHANG Qiuhai. Recent advances in logging while drilling[J]. World Well Logging Technology, 2013, 34(2): 7-17.
- [4] 李洪强,丁景丽,林楠,等. 随钻伽马测量数据处理方法的研究及应用[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(4): 12-14.
LI Hongqiang, DING Jingli, LIN Nan, et al. Research and application of data processing in gamma ray logging while drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(4): 12-14.
- [5] 骆庆锋,李安宗,陈鹏,等. 一种随钻伽马成像数据处理方法: CN201510927599.8 [P]. 2015-12-14.
LUO Qingfeng, LI Anzong, CHEN Peng, et al. A data processing method of gamma imaging while drilling: CN201510927599.8[P]. 2015-12-14.
- [6] 吴文圣,李梦婷. 随钻伽马成像测井方位分辨率计算方法及装置

- 与流程: CN201810292102.3[P]. 2018-04-03.
- WU Wensheng, LI Mengting. Azimuth resolution calculation method and device for gamma imaging logging while drilling: CN201810292102.3[P]. 2018-04-03.
- [7] XU Libai. Method for correcting natural gamma ray logging measurements: US15248962 [P]. 2016-08-26.
- [8] 史晓锋, 李铮, 蔡志权. 随钻电磁波传播电阻率测量工具探测深度研究[J]. 测井技术, 2002, 26(2): 113-117.
- SHI Xiaofeng, LI Zheng, CAI Zhiquan. Inversion depth of MWD propagation resistivity logging[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(2): 113-117.
- [9] 黄忠富, 黄瑞光, 陈鹏. 随钻电阻率测井仪器的实现[J]. 测井技术, 2002, 26(2): 172-175.
- HUANG Zhongfu, HUANG Ruiguang, CHEN Peng. Development of MWD resistivity logging tool[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(2): 172-175.
- [10] 杨震, 肖红兵, 李翠. 随钻方位电磁波仪器测量精度对电阻率及界面预测影响分析[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(4): 115-120.
- YANG Zhen, XIAO Hongbing, LI Cui. Impacts of accuracy of azimuthal electromagnetic logging-while-drilling on resistivity and interface prediction[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(4): 115-120.
- [11] 刘乃震, 王忠, 刘策. 随钻电磁波传播方位电阻率仪地质导向关键技术[J]. 地球物理学报, 2015, 58(5): 1767-1775.
- LIU Naizhen, WANG Zhong, LIU Ce. Theories and key techniques of directional electromagnetic propagation resistivity tool for geosteering applications while drilling[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(5): 1767-1775.
- [12] 倪卫宁, 张晓彬, 万勇, 等. 随钻方位电磁波电阻率测井仪分段组合线圈系设计[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 115-120.
- NI Weining, ZHANG Xiaobin, WAN Yong, et al. The design of the coil system in LWD tools based on azimuthal electromagnetic-wave resistivity combined with sections[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 115-120.
- [13] 王磊, 范宜仁, 邢涛, 等. 基于随钻电磁波测井资料的地层各向异性电阻率提取方法: CN201711336574.6 [P]. 2017-12-14.
- WANG Lei, FAN Yiren, XING Tao, et al. Extraction of formation anisotropic resistivity based on electromagnetic logging while drilling data: CN201711336574.6[P]. 2017-12-14.
- [14] 杨锦舟, 肖红兵, 杨全进, 等. 一种随钻电阻率近钻头测量装置: CN201310003353.2 [P]. 2013-01-06.
- YANG Jinzhou, XIAO Hongbing, YANG Quanjin, et al. A near bit measuring device for resistivity while drilling: CN201310003353.2[P]. 2013-01-06.
- [15] WANG Tsili. Apparatus and method for microresistivity imaging in which transmitter coil and receiver coil axes are substantially perpendicular to the longitudinal axis of the tool body: US13819122[P]. 2011-08-26.

[编辑 滕春鸣]

Weatherford 公司研制出 SwageHammer™集成式尾管悬挂器

为满足高压/高温、深水、大斜度井等苛刻条件下尾管固井时的密封要求, Weatherford 公司研制了 SwageHammer™集成式尾管悬挂器。该悬挂器集常规尾管悬挂器和膨胀式尾管悬挂器的优点于一体, 可大大提高高温高压条件下井筒整体的密封性, 降低尾管下入及整个作业过程中的风险。

SwageHammer™尾管悬挂器主要由顶部封隔器、坐挂机构、送入工具(包括坐挂驱动机构)组成。该悬挂器采用本体整体式设计, 将液压坐挂系统的液缸、传压孔以及内部橡胶密封结构从本体上移除, 且无密封螺纹连接, 以消除压力泄漏隐患, 并设计了独立的液压驱动坐挂机构, 集成到尾管下入工具上。下入尾管并提出尾管下入工具后, 留在井内的是一个完整的、没有任何压力泄漏隐患的整体结构。

当尾管下至设计位置, 投球憋压可激活独立的液压驱动坐挂机构, 将轴向压力转换为对回接筒的推力, 并传递给顶部封隔器及坐挂机构, 先后剪断坐挂剪钉及坐封剪钉, 实现悬挂器的坐挂与封隔器的坐封。该尾管悬挂器具有液压及机械 2 种丢手方式, 下入工具上设有特殊的翻转球座, 持续憋压将球座憋通, 球座翻转后能保证后续的固井施工顺利进行。该尾管悬挂器特殊的机构设计使其具有耐高温、高压和高承载等特点, 对气体和液体的密封能力在 204 ℃ 下均能达到 86.2 MPa, 其 $\phi 244.5 \text{ mm} \times \phi 177.8 \text{ mm}$ 尾管悬挂器的悬挂承载能力可达到 320 t 左右。同时, 该尾管悬挂器的下入工具设有大排量循环压力平衡系统, 下入尾管时, 通过传压孔沟通液缸活塞两端, 以确保其在大排量、高泵压循环时不会被提前激活而提前坐挂。

[供稿 杨德锴]