

井中激电仪阵列式采集系统设计

周 济¹, 毛玉蓉¹, 郭庆明²

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100; 2. 中国石油集团测井有限公司, 西安 710077)

摘要:目前大多数激电仪的采集系统置于地面,这样会导致对地下不同深度的电位变化分辨率不高。针对激电仪的深井探测局限性,提出一种井中激电仪阵列式采集系统,采用高精度数模转换器 ADS1282、阵列式的井下装置和高效的通信。通过仪器的 5 000 m 长电缆模拟以及实际下井实验等方法研究了该采集系统的可行性和可靠性。结果表明该系统能较好地实现激电法采集系统从地面到井中(深井)的突破,满足了井中激电勘探的需求。

关键词:激电法;ADS1282;井中采集系统;深井探测

中图分类号:TE132 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)01-0369-06

激发极化法(IP)是一种有效的勘察多金属和贵金属硫化物矿床的电磁勘探方法,将其用于测井中就形成了井中激发极化法(以下简称井中激电或井中 IP),井中 IP 可以充分利用已知的钻孔信息,使用地-井、井-井和井-地的勘探模式,在追索矿化带、估计可见矿深度和查证地面激电异常等方面发挥重要的作用。该方法可充分依靠已知的钻孔信息,在发现井旁、井底盲矿,追索矿化带,估计见矿深度,查证地面激电异常等方面发挥重要作用。

国内外激发极化探测技术与仪器开发以地面探测为主,先进仪器的代表有法国 Iris 公司的 Elres-6 激电仪、美国的 ZONGE 公司 GDP 系列和加拿大凤凰地球物理公司的 V8 系统等。国内主要有继善高科开发的 DS2 双频激电仪、北京地质仪器厂的 DGS-9 激电仪和重庆奔腾公司的 WDJ-4 多功能数字直流激电仪等。就目前调研情况来看,仪器的功率、灵敏度、深部高温高压条件的适应性等方面还达不到实用要求。尤其是井中激电仪的采集系统基本都是放在地面,传感器置于井中,通过传输线缆将激电信号送至地面,很少将采集系统置于井中,即便有仪器下井深度也较浅,尚未突破 1 000 m,难以满足 3 000 m 以浅的矿产勘查要求^[1]。

现阶段所面临的主要问题是浅部资源开采逐渐枯竭,深部资源的探测与开发成了摆在国内外众多科研机构面前的重要课题。本文提出一种井中激电仪多通道采集系统,分辨率达到 0.1 μV ,耐温

150 $^{\circ}\text{C}$,耐压 100 MPa,可进行 3 000 m 井深的探测。

1 原理

激发极化法是以岩、矿石的激电效应差异为物质基础,通过观测和研究地下介质的激电效应的分布规律,达到勘查地下地质分布的一种电法勘探方法。它是向大地供入稳定的大电流,地下底层发生复杂的电化学反应,采用一定极距的装置形式,观测测量电极之间的电位差,研究地下横、纵向激发极化效应的变化^[2-3],达到探测深部资源的目的。观测参数为一次场电位差 $\rho(0) = K\Delta V(0)$ 和二次场电位差 ΔV_2 , K 为装置系数,计算参数为视极化率 $\eta(T, t)$ 、等效电阻率 ρ 、充电率 M 和激电率 G 。

井中激发极化法有多种装置进行探测,本文主要以地-井(地面发射,井中接收)方式研究井中激电仪的阵列接收系统,如图 1 所示。

图 2 为岩矿石标本上观测到的电位差变化曲线。当通过供电电极 A、B 向标本供电时,测量电极间观测到的电位差仅与标本的导电性相关,即电流流过标本时由于欧姆电阻形成的电位差,称为一次场电位差 ΔV_1 ,在稳定电流场中 ΔV_1 不随时间变化。当供电延续一定时间后,由于标本物化特质,标本会被极化,由于激发极化产生的二次场电位差 ΔV_2 随时间逐渐变大,因而电位差曲线随时间很快增大,最后缓慢趋于某一饱和值^[4]。显然,此时观测到的电位差 $\Delta V(T)$ 是一次场电位差和二次场电位

收稿日期:2021-09-13

基金项目:国家自然科学基金青年计划(41904077);国家自然科学基金(41774082)。

作者简介:周济(1997—),男,湖北宜昌人,长江大学,硕士研究生,研究方向为地球物理仪器;通信作者毛玉蓉(1976—),女,湖北荆门人,长江大学,副教授,博士,研究方向为油气信息探测与仪器装备。

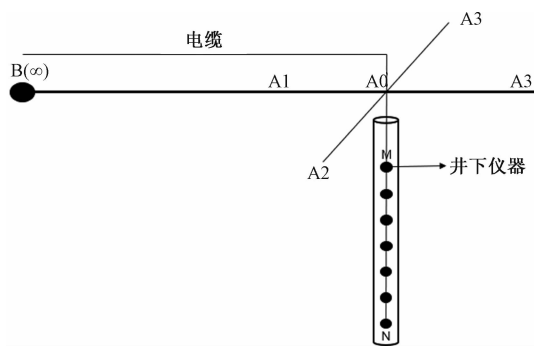


图 1 地-井工作方式

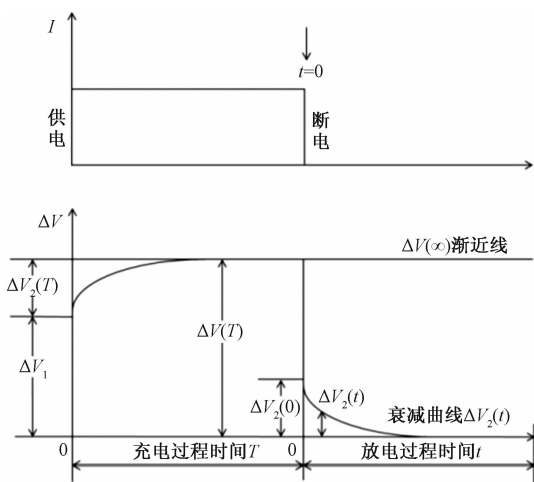


图 2 矿化石标本激发极化效应过程

差之和,即

$$\Delta V(T) = \Delta V_2(T) + \Delta V_1 \tag{1}$$

当切断供电电流后,一次场电位差立即消失,被极化的标本在激发极化电动势推动下通过标本本身和周围的溶液放电。此时的二次场电位差 $\Delta V_2(t)$ 将随时间衰减逐渐趋于 0。实践证明,充电达到饱和的二次场电位差和断电瞬间的二次场电位差是相等的,即

$$\Delta V_2(t) \mid t = 0 = \Delta V_2(T) \tag{2}$$

根据一次场和二次场的电压差,在二次场与电流呈线性关系的条件下,极化率 $\eta(T, t)$ 由以下公式定义:

$$\eta(T, t) = \frac{\Delta V_2(t)}{\Delta V(t)} \times 100\% \tag{3}$$

由于 $\Delta V_2(t)$ 和 $\Delta V(T)$ 都与供电电流成正比,因此极化率与电流无关,但取决于供电时间 T 和测量延迟时间 t 。

利用测得的一次场电位差 $\Delta V_1[\Delta V(0)]$, 可以计算出介质的电阻率:

$$\rho = K\Delta V_1 \text{ 或 } \rho(0) = K\Delta V(0) \tag{4}$$

在二次场和总场与电流成线性关系条件下,也可用总场电位差 $\Delta V(T)$ 计算出包括介质激发极化效应在内的等效电阻率:

$$\rho^* = \rho(T) = K\Delta V(T) = \frac{\rho}{1 - \eta(T, t)} \tag{5}$$

充电率 M 的公式为

$$M = \frac{1}{\Delta V(T)} \int_{t_1}^{t_2} \Delta V_2(t) d(t) \tag{6}$$

研究岩矿石的激发极化性质还可直接利用二次场及其时间特性,当直接利用二次场电位差时,可计算参数激电率 G ,即

$$G = K\Delta V_2(t) \tag{7}$$

综上,激电法算等效电阻率需要的主要参数就是一次场和二次场的电压值,因此采集系统的主要采集参数就是实时电位和电位差数据,将数据采得后再进行数学处理即可求得电阻率和极化率等参数。

2 系统方案

根据激发极化法勘探方法,井中激电仪阵列采集系统结构上不仅要能适用于小井径大深度的矿井,还需要采用充电法和极化法两种模式观测。因要从硬件上解决充电信号动态范围大而极化信号动态范围较小的矛盾,各通道相互独立,可灵活调整电极距,同时采集,按照一定数据格式记录存储时间序列。图 3 所示为采集系统的整体方案设计结构。

整体系统结构分为两部分:各采集子节点和系统主控节点。各采集子节点有独立的 ID,进行电位和电位差信号的测量,采集数据通过 CAN 总线传输至总控节点,由主控节点来进行总线仲裁,进行数据的内部传递,并且各采集板电源隔离,信号也隔离。这种结构可以保证各通道完全独立。即使有某一个通道故障,也能保证探测工作正常进行,不会中止探测。采集子节点由前置仪表放大器、滤波器、程控增益放大器、模数转换器 ADC、低失真数模转换器 DAC、供电电源等部分构成。由于电位差和电位测量输入方式有差异,这两部分模拟通道电路将分开设计,实现充电电位和放电电位的采集。考虑到井中弱信号采集,而接收电极之间间距至少 1 m 以上,在系统结构上采用就近原则,每个电极连接一个采集单元,可以在结构上就抑制了干扰信号。

激电仪采集系统进行全波形采集,既要测量大电流供电时的总场电位,又要测量关断后的二次场以及极化信号,经过数值模拟计算,信号之间数量级差 3~5 个数量级,这就要求仪器的动态范围足

够大,同时又要保证极化弱信号的采集的分辨率。系统中采用高精度耐高温的 32 位 A/D 转换器

ADS1282,为了仪器标定,加入了配套的 DAC1282 作为标准信号。图 4 为数据采集子节点结构。

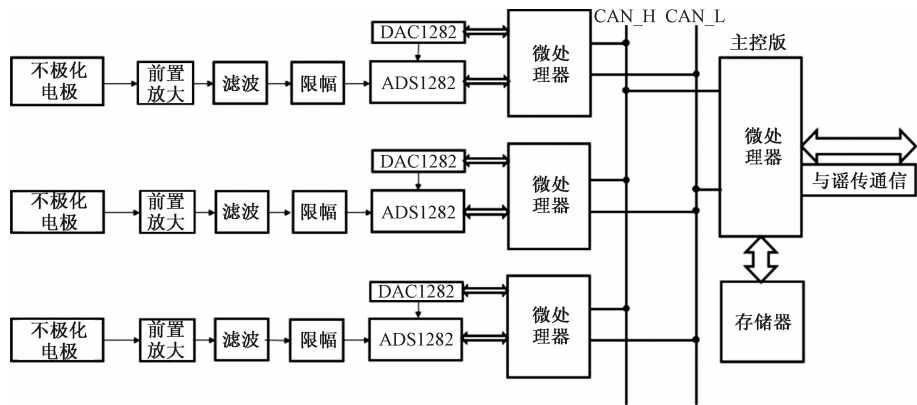


图 3 井下采集系统结构

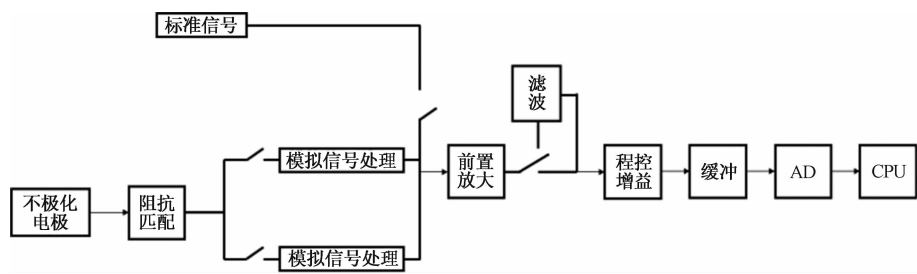


图 4 数据采集子节点结构

主控板没有采集模块,在采集系统中作为通信中枢和数据存储点,连接了耐高温高可靠性的 NAND 型存储器,在接收到来自采集板的数据后,即时上传的同时,并行传输存储到存储器里,便于后期的数据二次调取。图 5 为主控板的功能结构图。

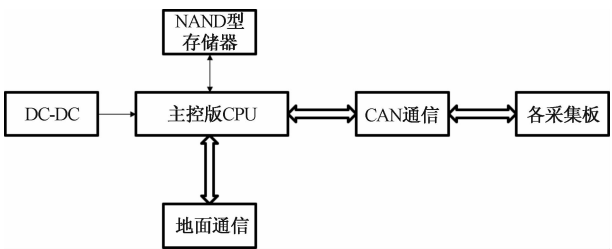


图 5 主控板功能结构

3 ADS1282 特点及使用配置

3.1 ADS1282 简介

前文提到了采集系统要采集的电位数据会跨越多个数量级,因此整个数据采集系统性能的关键是 ADC 芯片的选择。经过比较分析并基于高精度、大动态范围和低噪声的考虑,本系统选用 TI 公司的 ADS1282 作为核心 ADC 器件^[5]。

ADS1282 是德州仪器 (TI)公司生产的一款用于地震监测和能源勘探且具有 PGA 的超高分辨率 4kSPS 2 通道 $\Delta-\Sigma$ ADC,ADS1282(以下简称 AD)具有以下几点突出优点^[6]:①AD 具有双通道输入多路复用器,可以方便井下完成标定和采集工作。AD 可以用于 $-55\sim 210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工作环境,因此可以在井下保持工作,在 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下,功耗为 25 mW,不会对电源提出过高的要求;②高精度。总谐波失真 (THD) 为 -122 dB ,积分非线性 (INL) 为 0.5 ppm ;③灵活的数字滤波器。可选择 Sinc+FIR+IIR 滤波的不同组合方式,其中 FIR 滤波方式可编程设置为线性或最小相位响应,数据输出率可在 250 SPS 至 4 KSPS 之间选择。

3.2 ADS1282 的初始化配置

图 6 为 AD 的简化电路原理图。从图 6 可以看出,AD 与 MCU 的通信方式为 SPI 通信,SPI 通信的缺点在于若有多个从机,则会占用大量的主板引脚。这套采集系统里,每个 MCU 只与一个 AD 进行数据通信,很好地规避掉了 SPI 的缺点,保留了 SPI 通信速率快、可靠性高的优点。AD 双通道的输入编辑寄存器 CONFIG1 中 MUX[2:0]的值为“010”全部启用,将其一个用于转换电极采集的数

称 DA)是 TI 公司生产的一种高性能数模转换器,可提供正弦、脉冲、直流 3 种波形且支持外部数据流输入。其出色的耐温能力(−50~125 ℃)和低功耗以及高信噪比是选用这款器件的主要原因。

DA 的接口同样也是采用 SPI 接口,工作模式与前文 AD 相同。数字增益和模拟增益一般设为 1,即发出信号的幅值为±2.5 V,处于 AD 的检测极限,若 AD 采集的数据常出现超量程的情况,可将模拟增益调低来避免 AD 饱和。

DA 的信号产生配置较简单,将 GANMOD 寄存器设置为对应的值即可转换为对应的信号,然后根据不同信号选择不同的寄存器进行频率、幅值等参数的写入,即可产生对应的信号。

4 阵列式通信结构

井下设备多时,就需要搭建通信网络,这里主要用 CAN 总线。CAN 总线上的数据是以数据帧的形式进行通信的,CAN 总线上的任何报文都会被所有的 CAN 节点进行接收,然后每个节点的过滤器与接收器会与报文信息中的 ID 进行匹配,当匹配吻合时,报文会被接收,否则不存入接收器。在一个数据帧结构中,帧起始是总线上的 SOF(显性),随后的仲裁段里面包含了标志位 SID(扩展数据帧还有 EID),仲裁段存放各节点的“地址”信息,用于判断信息是否接受,之后的控制段用于规定数据段的长度,数据段长度可变,单帧的数据段长度为 0~8 BYTE,CRC 段是 CAN 模块自带的校验段,消息发送方通过在帧里添加一个 CRC 帧检测序列来保证安全。

这套采集系统中,主控板就是 CAN 通信中的“主机”,地面的指令由主控板下发到各“从机”采集板,这样就有效避免了各节点报文互相干扰,也能更高效地提取到有效命令。需要提到的是,在 CAN 总线上,不可避免地会有多个节点同时往总线上发送帧的情况,此时数据并不会产生紊乱,而是会根据发送节点的地址,高地址先发,低地址后发,所以可以通过编辑各节点的 SID 寄存器来决定优先级,虽有先后顺序但 CAN 的通信速率极快,完全不必担心因此而影响即时性或者同步性的问题。

5 功能测试

经过在线仿真确认功能基本实现后,制板进行了实际测试。图 8 为实体调试,图 9 为系统各部分短节。

地面系统的主要功能是控制井下采集系统的工作模式(标定、采集等)、数据读回和显示、数据处



图 8 实体调试



图 9 系统中的各种短节

理等^[9]。本次的上板测试,包括指令的收发、数据的读回及显示。图 10 为采集系统的返回数据。

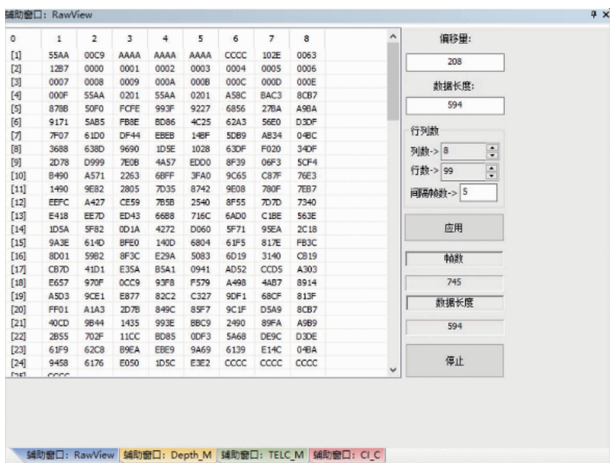


图 10 采集系统返回数据

每次通信以 55AA 为报文头,CCCC 为报文尾,中间为数据段,不同位置对应不同板的数据,以上测试为两道数据。经校验,数据正确率为 100%,这也依赖于 CAN 总线自身的 CRC 校验,当数据发送错误时数据帧会自动重新发送。接收到数据后,地面系统会实时绘制数据曲线。图 11 为采集数据的实时曲线。

图 11 中,红色曲线为模拟通道的外加方波信

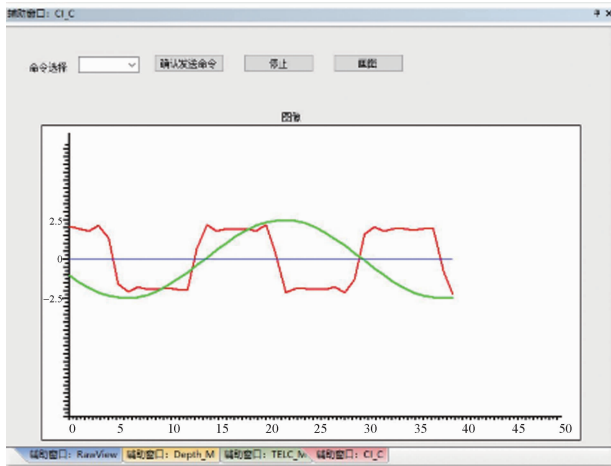


图 11 采集数据曲线

号,绿色曲线为标定的正弦信号,两道数据均能较准确地反映信号,但模拟通道上还存在部分干扰,图形并不十分规整,可以通过后期数据叠加等其他数据滤波方法进行处理。

6 结语

激发极化法早已大量应用在地质勘探领域,但激电仪器上的突破却十分有限。本文结合激电法的特点,采用了性能强大的 ADC,充分发挥 CAN 总线自身的诸多优点和多点通信的特点,设计了一套深部(井中)阵列式的采集系统,经过模拟及实际下井,测得数据可靠,对激电仪的采集系统设计有一

定的参考意义。

参考文献

[1] 杨旭超. 基于无线通信技术的分布式激电仪的设计[D]. 成都:成都理工大学,2012.

[2] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京:地质出版社 2007: 280-287.

[3] 熊远鹏,曾桂强,李开鹏. 激发极化法在云南大宝山铜矿勘查中的应用效果[J]. 矿产勘查,2016,7(6):984-988.

[4] 韦金文,蔡昌华,姚鹏飞. 激电测深在南方某矿床找铀矿中的应用[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2017,40(3):293-296.

[5] 王琳,商周,王学伟. 数据采集系统的发展与应用[J]. 电测与仪表,2004(8):4-8.

[6] 王怀秀,朱国维,王栋. ADS1282 及其在单通道地震数据采集单元中的应用[J]. 电子设计工程,2010,18(10): 176-179.

[7] 陈德武,魏新建,禄娟,等. 一种高精度地面微测井资料解释方法[J]. 长江大学学报(自然科学版),2020,17(5): 25-29.

[8] 严超,陈儒军,申瑞杰,等. 分布式多通道电法电磁法数据同步采集系统[J/OL]. 地球物理学进展: 1-10[2020-10-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20180725.1141.074.html>.

[9] 简志景,梁昊. 一种基于 FPGA 的多通道数据采集系统设计[J]. 信息技术与网络安全,2020,39(9):6-11.

[10] 汪洋. 井中激电法探测金属矿应用研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2016.

Design of Array Acquisition System of Logging IP Apparatus

ZHOU Ji¹, MAO Yurong¹, GUO Qingming²

(1. Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration Technology Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. China National Logging Corporation, Xi'an 710077, China)

Abstract: At present, most of the IP instrument acquisition systems are placed on the ground, which will result in low resolution of potential changes at different depths underground. Aiming at the limitations of the IP instrument's deep well detection, a array type acquisition system of logging IP instrument was proposed. The system uses a high-precision digital-to-analog converter—ADS1282, an array type downhole devices and efficient communication. The feasibility and reliability of the acquisition system were studied through the 5 000 m long cable simulation of the instrument and the actual downhole experiment. The results show that the system can achieve the breakthrough of the IP method acquisition system from the surface to the well (deep well), and can meet needs of In-hole IP exploration.

Keywords: IP method; ADS1282; logging acquisition system; deep logging exploration