

# 岩矿石电性实验宽频序列信号发送机设计

程辉<sup>1,2</sup>, 付国红<sup>1</sup>, 刘晓琼<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 先进矿山装备教育部工程研究中心, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘要:**针对地球物理学基础物性测试实验工作中拥有自主知识产权实验用仪器发展缓慢, 实验用仪器型号少的现状, 利用复杂可编程逻辑器件(CPLD)为波形产生单元、ARM 处理器为仪器主控单元设计了步长为对数等间距, 频点间以 2/3 倍频点进行加密、带宽为 0.001 ~ 1 000 Hz、可选多档恒流输出的频率域岩矿石电性实验序列信号发送机。室内实验与模拟器件实验表明: 该信号源输出电流恒定、波形频率准确, 可用于实际实验工作。

**关键词:**物性实验; 仪器设计; 信号源; 模拟实验

中图分类号: P631 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2014)02-0022-05

## Design of rocks and minerals electrical properties of experimental serial signal transmitter

CHENG Hui<sup>1,2</sup>, FU Guo-hong<sup>1</sup>, LIU Xiao-qiong<sup>1</sup>

(1. Engineering Research Center for Advanced Equipment of the Ministry of Education, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
2. Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China)

**Abstract:** For basic physical testing experimental work, it is a fact that the testing experimental apparatus with independent intellectual property rights developed slowly and the types are limited, So an experimental signal transmitter was designed, for electrical properties of rocks and minerals, which had logarithmic equidistant step and during spacing points encrypted as 2/3 frequency doubling, and its bandwidth was between 0.001 Hz to 1 000 Hz and it was with optional multi-range constant-current output. After both laboratory experiment and analog experiments, the results showed that the signal source sends constant current and the accurate waveform frequency. In all, the transmitter can be used for practical experimental work.

**Key words:** physical testing experimental; instrument design; signal source; simulated experiment

我国电法勘探始于 20 世纪 30 年代, 由当时北平研究院物理研究所的顾功叙光生所开创。经过 80 余年的发展, 我国的电法勘探无论在基础理论、方法技术和应用效果等方面都取得了巨大的进展, 使电法成为应用地球物理学中方法种类最多、应用面最广、适应性最强的一门分支学科。应用电法与电磁法进行理论研究与实际勘探工作的物理基础

是地下介质的电性差异, 一般来说地下介质的电性差异主要为电导率、介电常数与极化率等电性敏感参数。1934 年斯密斯·罗斯(Smith-Ross)第一次观测到了岩(矿)石的复电阻率性质; 二战后, 地球物理学家们从不同的角度进行了大量的岩石频率特性研究工作。Wait<sup>[1]</sup>, Ward<sup>[2]</sup>, Carlos A. Dias<sup>[3-5]</sup>, W. H. Pelton<sup>[6-7]</sup>, K. L. Zonge<sup>[8-9]</sup>, J. Wong<sup>[10]</sup>,

收稿日期: 2014-02-19

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(13JJ3088, 14JJ6034); 湖南省科技厅项目(2012TP4023-6, 2012TP4023-5); 湖南省自然科学基金湘潭市联合基金项目(12JJ9008)

通信作者: 程辉(1976-), 男, 湖南津市人, 博士, 讲师, 主要从事岩矿石电性特征及观测系统研究。E-mail: chenghui0714@hotmail.com

都先后在实验探索了岩矿石的电性参数,并此提出了多种新的地球物理方法与理论;同时中国地球物理学会于1982年11月在上海召开了第一次岩石物理性质学术讨论会,并出版了《岩石和矿物物理性质论文集》.何继善<sup>[11-12]</sup>、徐世浙<sup>[13-14]</sup>、罗延钟<sup>[15]</sup>、张赛珍,石昆法<sup>[16]</sup>等人对岩石复电阻率频散特性的机理、导电模型等方面做了深入的研究,并做了有益的分析工作.另外还有一部分学者为了研究油气储层的导电性差异关系进行了大量的研究,如安珊,童茂松,丁柱,肖占山,柯式镇,范宜仁等针对油田测井中的实际问题进行了关于沉积岩层的大量物理室内实验和数值分析工作,从不同程度上解决了油气测井工作遇到的实际工程问题.2009年底青云<sup>[17-18]</sup>研究员进行了针对长偶极、大功率、电流源激励条件下,岩石物性参数频率响应的数值模拟与计算工作,通过三维积分方程法计算了“地-电离层”大尺度有源场的典型岩石物性的频率响应特征,并给出了不同模型下的关系曲线.在开展理论研究的同时部分学者开展了岩矿石电性参数的室内物理实验工作,文献中涉及实验用仪

器设备基本为国外仪器设备,如张赛珍先生前期采用BT6型仪器获取实验数据,1988年后用英制1250型频率特性分析仪获取实验数据,在此之后国内鲜见研制新仪器与设备用于地球物理基础电性参数实验研究.

为此,本文所设计的信号源主要针对实际实验工作,产生不同频率、不同波形以及不同振幅的频率信号.即:

- 1) 频率范围  $2^{-10} \sim 2^{10}$  Hz 频点之间以 1.5 倍频进行频点加密,共计 41 个频点;
- 2) 产生单、双频电法勘探校准信号以及可调频率的频率信号;
- 3) 振幅上可输出最高值为 15 V 的实验用多档电压值;
- 4) 输出信号的电流为恒流输出方式,共 8 档以保证使用切磨标本或自然标本使用.

设计中采用 STM32F103RCT6 单片机作为中央控制器,运用 CPLD 复杂可编程逻辑器件产生正反两路  $2^{-10} \sim 2^{10}$  Hz 共 41 种频率的变频率序列信号.其系统框图如图 1.

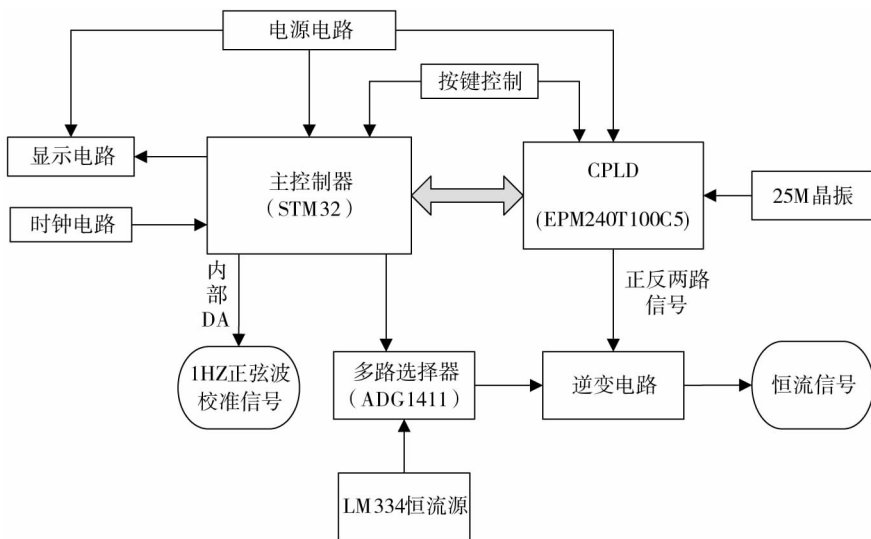


图1 系统总体框图

## 1 恒流源设计

无论采用二极法还是四极法,一般的,标本在大电流 ( $>0.2 \text{ mA/cm}^2$ ) 频率域信号下激励下表现为非线性特性,但在小电流 ( $<0.2 \text{ mA/cm}^2$ ) 的情况下则会表现线性特性;同时,不同岩性的岩矿标本的电阻率可以相差多个数量级,因此,在负载为岩矿标本的电性实验过程中对信号源输出的信号恒定要求较高,为系统设计过程中为研究重点之一.

设计中采用美国国家半导体公司生产的三端

可调恒流源芯片 LM334 完成恒流工作.该芯片具有以下特征:

- 1) 工作电流内,恒流源可以调节范围比可达 10 000:1;
- 2) 1 V 到 40 V 宽的动态电压范围;
- 3) 外接元器件简洁
- 4) 交变信号作用下既可整流又可恒流源.

LM334 温度系数约为  $-2.3 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ ,而硅二极管的正向偏压负温度系数约为  $-2.5 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ .电阻  $R_{23}$  和硅二极管 IN4148 串联后与  $R_{23}$  并联,就可以

通过计算  $R_{22}$  与  $R_{23}$  的比值抵消对 LM334 温度补偿, 构成精度较高的恒流源. 如图 2 所示.

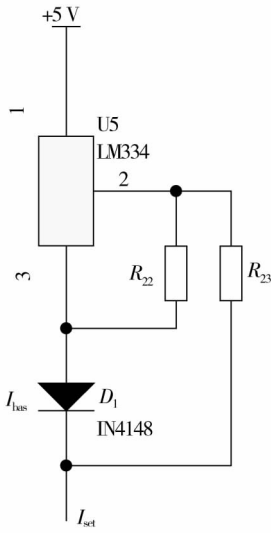


图2 恒流源电路

当  $R_{23}/R_{22} = 10/1$  时, 可以通过硅二极管的负温度补偿掉 LM334 的正温度带来的影响. 当然, 实际恒流源电路的温度系数只是接近零, 为了获得更好的结果, 可以在规定的温度范围内测试  $I_{set}$  温度系数.

流过 LM334 的总电流  $I_{set}$  是流过设置电阻  $R_{23}$  的电流  $I$  和 LM334 偏置电流  $I_{bias}$  的总和. 在  $2 \mu A \leq I_{set} \leq 1 \text{ mA}$  的电流范围内满足式(1)

$$\text{当 } R_{23}/R_{22} = 10/1 \text{ 时,} \quad I_{set} = \frac{0.134}{R_{22}}. \quad (1)$$

设计 2 组 8 路信号输出端就可以得到不同电流强度信号源, 并可计算出不同档位的电阻值. 现以其中 1 组进行讨论. 图 3 所示为设计原理图.

$$\text{当 } I_{set} = 0.2 \text{ mA 时,} \quad R_{23} = 10 R_{22}. \quad (2)$$

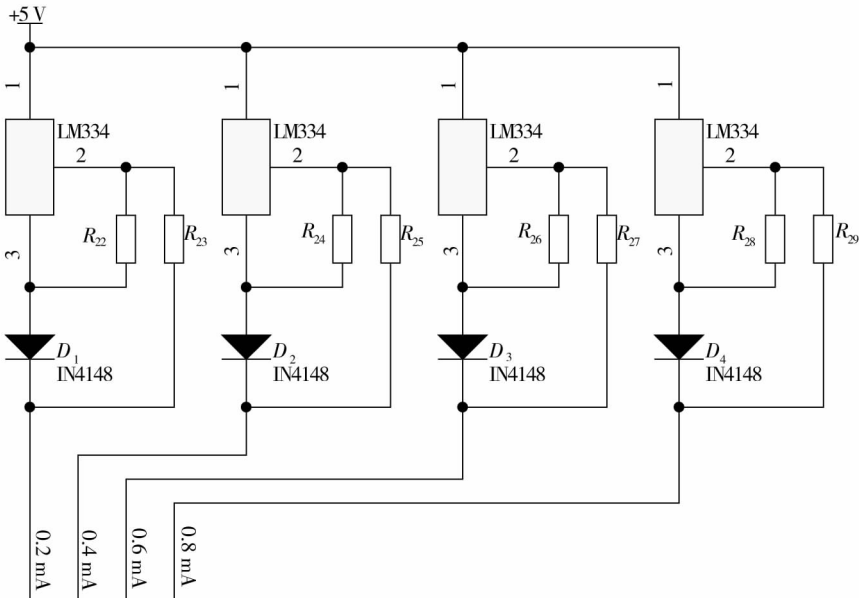


图3 恒流源输出电路

$$I_{set} = 0.2 \text{ mA} = \frac{0.314}{R_{22}}. \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可知,  $R_{22} = 670 \Omega$ ;  $R_{23} = 6700 \Omega$ .

$$\text{当 } I_{set} = 0.4 \text{ mA 时,} \quad R_{25} = 10 R_{24}. \quad (4)$$

$$I_{set} = 0.4 \text{ mA} = \frac{0.314}{R_{24}}. \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可知,  $R_{24} = 335 \Omega$ ;  $R_{25} = 3350 \Omega$ .

$$\text{当 } I_{set} = 0.6 \text{ mA 时,} \quad R_{27} = 10 R_{26}. \quad (6)$$

$$I_{set} = 0.6 \text{ mA} = \frac{0.314}{R_{26}}. \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知,  $R_{26} = 233.3 \Omega$ ;  
 $R_{27} = 2333 \Omega$ .

$$\text{当 } I_{set} = 0.8 \text{ mA 时,} \quad R_{29} = 10 R_{28}. \quad (8)$$

$$I_{set} = 0.8 \text{ mA} = \frac{0.314}{R_{28}}. \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可知,  $R_{28} = 167.5 \Omega$ ;

$R_{29} = 1675 \Omega$ .

由此可以计算另外 4 路恒流电路输出参数.

## 2 信号输出

信号输出主要由逆变电路完成, 该系统设计的核心思路是测试以岩矿石标本为负载的岩矿石频谱特征. 如图 4 所示, 输出时采用全桥式恒流逆变电路, 电路由 Q1, Q2, Q3, Q4 4 个 MOSFET 管

SI2301 组成. 输入的 2 个信号分别为 CPLD 输出的正向(ZXWAVE)、反向(FXWAVE)两路变频序列输入信号. 当 ZXWAVE 为高电平,FXWAVE 为低电平时,Q1,Q4 导通,Q2,Q3 截止,电流方向为 B 流向 A;反之,当 ZXWAVE 为低电平,FXWAVE 为高电平时,Q2,Q3 导通,Q1,Q4 截止,电流方向为 A 流向 B,从而输出交流信号. 该逆变电路可以输出如图 5 所示实验中常用的 3 种波形. 当正向输出和反向输出交替进行时,波形如图(a)所示;当正向有输出,反向无输出时,波形如图(b)所示;当反向有输出,正向无输出时,波形如图(c)所示.

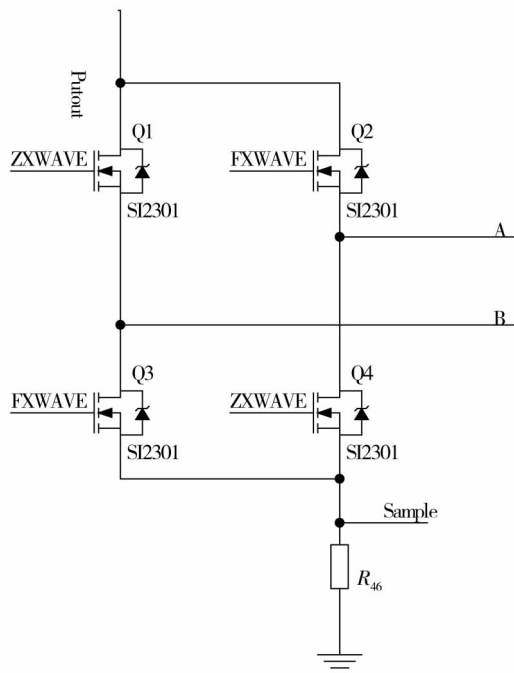


图 4 全桥式逆变电路

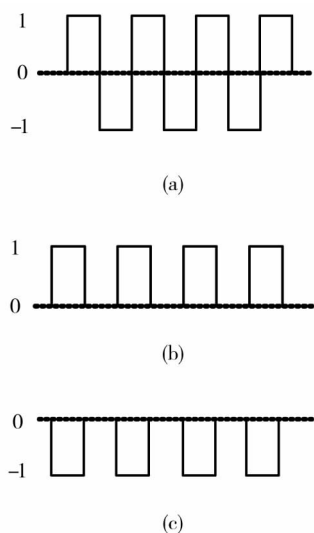


图 5 实验中常用的 3 种波形

### 3 实验数据调试

#### 3.1 多档恒流电路的测试

通过加载不同阻值的电阻器模拟岩矿石标本,以按键控制 4 路恒流电源的输出数据显示,当 CPLD 输出频率为 32 Hz 时,测出的在不同电阻负载下 4 个档位输出的实际电流如表 1 所示.

表 1 频率为 32 Hz 时 4 个档位输出电流值

电阻 /Ω	0.2 mA 档/mA	0.4 mA 档/mA	0.6 mA 档/mA	0.8 mA 档/mA
10	0.190	0.401	0.601	0.807
50	0.191	0.399	0.597	0.803
200	0.195	0.402	0.597	0.801
510	0.194	0.402	0.598	0.811
1 000	0.195	0.403	0.601	0.810
2 000	0.197	0.400	0.601	0.805
20 000	0.197	0.402	0.599	0.805

当输出频率为 256 Hz 时,测出的在不同电阻负载下 4 个档位输出的实际电流如表 2.

表 2 频率为 256 Hz 时 4 个档位输出电流值

电阻 /Ω	0.2 mA 档/mA	0.4 mA 档/mA	0.6 mA 档/mA	0.8 mA 档/mA
2	0.193	0.409	0.602	0.806
50	0.194	0.409	0.608	0.802
200	0.191	0.409	0.607	0.802
510	0.194	0.401	0.600	0.802
1 000	0.194	0.403	0.603	0.806
2 000	0.197	0.405	0.603	0.805
20 000	0.193	0.390	0.593	0.790

从表 1 和 2 可以看出在改变外部负载的情况下,每个档位的电流值基本上保持不变并且电流大小符合理论要求. 并且频率的变化对输出的电流的影响较小.

#### 3.2 放大电路测试

测试中通过测试采样电压的值和放大 21 倍以后的实际值,适当的调节滑动变阻器调零,得到如表 3 的测试数据.

表 3 放大电路数据测试

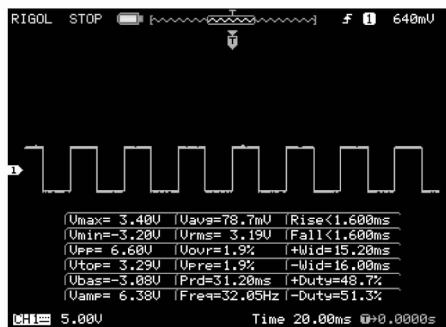
输入电压/mV	输入电压/mV	放大倍数
11.5	238	20.7
25.6	535	20.9
38.0	788	20.8
53.0	1 106	20.9

从表 3 可以看出,在放大电路的作用下,其放大倍数接近 21 倍,误差优于 1%,故放大电路工作

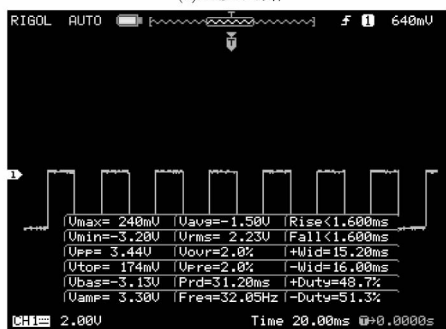
正常.

### 3.3 测试输出的波形

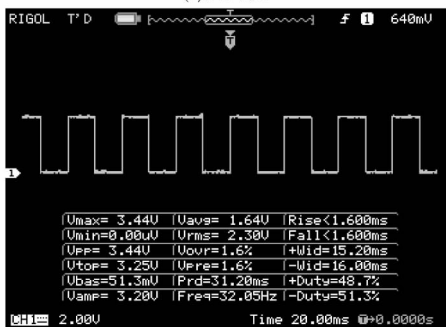
逆变电路两端负载电阻模拟岩矿石标本后,控制 CPLD 正反两路产生的波形得到的输出波形.



(a)正反两路



(a)反向波



(a)正向波形

图6 示波器测试的波形图

## 4 结论

1)由单片机作为主控单元,CPLD 作为波形产生器既利用了 CPLD 丰富的片上资源又利用了单片机的管理功能,减少了外围电路,降低了系统的不稳定因素,提高了系统整体性能,并可以按实验需求随时调整频率.

2)频率发生范围为  $2^{-10} \sim 2^{10}$  Hz,基本满足了目前岩矿标本室内实验所需频段范围,并以整数频点为基准进行 1.5 倍频加密,加大了频点密度,提高了实验数据的可靠程度.

3)输出信号为多档可选恒流、恒压输出,满足了岩矿标本实验过程的低压、低电流的要求.

## 参考文献:

- [1] Wait J R . A phenomenological theory of overvoltage for metallic particles[M]. Internat Series on Earth Sciences 4, 1959 :22 - 28.
- [2] Ward S H, Fraser D C. Conduction of electricity in rocks [J]. Mining geophysics, 1967,2(Part D) :197 - 223.
- [3] Dias C A. Non - grounded method for measuring induced electrical polarization and conductivity [D]. Berkeley: University of California , 1968.
- [4] Dias C A. Analytical model for a polarizable medium at radio and lower frequencies. [J] Journal of Geophysical, 1972,77(26) : 4945 - 4956.
- [5] Dias C A. Developments in a model to describe low - frequency electrical polarization of rocks[J]. Geophysics, 2000, 65(2) : 437 - 451.
- [6] Pelton W H. Interpretation of induced polarization and resistivity data [D]. Salt Lake City: University of Utah,1977.
- [7] Pelton W H, Ward S H, Hallof P G, et al. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP[J]. Geophysics, 1978(43) :588 - 609.
- [8] Zonge K. Electrical properties of rocks as applied to geophysical prospecting [D]. Arizona: University of Arizona, 1972.
- [9] Zonge K, Sauck W, Sumner J. Comparison of time, frequency, and phase measurements in induced polarization[J]. Geophysical Prospecting, 2006,20(3) : 626 - 648.
- [10] Wong J. An electrochemical model of the induced - polarization phenomenon in disseminated sulfide ores [J]. Geophysics, 1979(44) : 1245 - 1265.
- [11] 何继善,李大庆. 双频道频谱激电的非线性效应[J]. 科学通报, 1994,39(5) : 442 - 444.
- [12] 何继善,李大庆. 双频道频谱电非线性效应研究[J]. 地球物理学报, 1995,38(5) : 662 - 675.
- [13] 肖占山,徐世浙,罗延钟,等. 岩石复电阻率的“U”形曲线[J]. 科技通报, 2006,22(6) : 757 - 760.
- [14] 肖占山,徐世浙,罗延钟,等. 岩石复电阻率频散特性的机理研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2006,33(5) : 584 - 587.
- [15] 罗延钟,吴之训. 谱激电法中频率相关系数的应用 [J]. 地球物理学报, 1992, 35(4) : 490 - 500.
- [16] 石昆法,吴璐莘,李英贤. 储层条件下岩石样品电性参数测定及规律 [J]. 地球物理学报, 1995, 38(A01) : 295 - 302.
- [17] 底青云,王光杰,王妙朋,等. 长偶极大功率可控源激励下目标体电性参数的频率响应[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1) : 275 - 280.
- [18] 底青云,王妙月,王若,等. 长偶极大功率可控源电磁波响应特征研究[J]. 地球物理学报, 2008,51(6) : 1917 - 1928.