

doi: 10.11720/wtyht.2018.1468

包金成.一种正弦波相位激电应用的新方法[J].物探与化探,2018,42(4):712-724.http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1468

Bao J C.The sine wave phase IP method[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2018,42(4):712-724.http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1468

一种正弦波相位激电应用的新方法

包 金 成

(河南省有色金属地质矿产局第三地质大队,河南 郑州 450046)

摘 要:根据目前频谱激电和相位激电使用中遇到的问题,提出一种正弦波相位激电的新方法,基于单频正弦波窄带滤波可以大分贝衰减干扰信号、和固定频率滤波的物理相移可补偿的特性,在正弦波波形锁定的情况下,用单片机计数器直接读取激电绝对相位,在正弦波波峰处定位 A/D 采集振幅计算电阻率,正弦波相位激电的工作频率 1~12.5 Hz,具有原理简单快捷、设备成本低、电极接地条件要求不高、物探测量速度快的特点,抗工频干扰和抗游散直流干扰能力强,特别适合矿山物探,新方法有望解决目前频率域激电高成本、低效益和不适合地质普查的缺点,并在矿山生产中拓展新应用。

关键词:相位激电仪;正弦波;信号同步;物理相移

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2018)04-0712-13

0 前言

在有色金属物探中,常规的时间域激电法为勘查解释工作提供了很多重要依据,达到了预期的找矿效果,但其中仍有相当数量的激电数值异常是由于地层中存在石墨等干扰而产生,因此在寻找铜、铅、锌等有色金属矿的异常验证中失败。时间域激电应用遇到瓶颈。近年来,随着物探设备的更新换代,频谱激电法和相位激电法在区分石墨异常和矿致异常中得到了有效的验证^[1-2],但这些频率域激电的原理复杂,成本高,野外操作要求严,效率低。本文根据相位激电的原理和物探施工的特点,介绍一种简单快捷和低成本的正弦波相位激电的方法以及实现这个方法的原理和措施,既能解决时间域激电的瓶颈问题,又能在频率域激电的方法应用上有所补充和改进。

1 正弦波相位激电的理论基础

根据 W.H.Pelton 等通过对大量岩矿石标本和露头测量以及 Cole-Cole 模型对激电效应的频率特

性描述,复电阻率表达式为:

$$\rho(i\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\};$$
$$\omega = 2\pi f,$$

其中: ρ_0 表示零频率时的电阻率, m 、 τ 、 c 分别表示极化率(或充电率)、时间常数和频率相关系数。

频率域激电有频谱激电和相位激电两个分支。频谱激电(SIP)依据柯尔理论,在 $10^{-3} \sim 10^2$ Hz 的广域内观测,近几年来发展较快。野外测量中,频谱激电一般用 0.031 3~256 Hz 宽频段内的 27 个频点来供电发射,接收机对接收的信号,先经过工频干扰信号的陷波器处理,然后在宽频带的范围内做信号放大和 A/D 采集,经过傅里叶变换和 DSP 运算,得出零频电阻率 ρ_{s0} 和各个频点的电阻率 ρ_s 、充电率(激化率) m_s 、时间常数 τ_s 、频率相关系数 C_s 。根据实验和野外实践,地质上金属硫化物矿和矿化为高极化、低电阻率、中等时间常数($\tau_s = 0.5 \sim 2$ s)、小频率相关系数($C_s < 0.2$)特征,石墨等碳质干扰为低阻、高极化、大时间常数($\tau_s > n.10$ s),较大频率相关系数($C_s > 0.3$)特征。以此作为物探找矿的依据,实践中取得了较好的效果,并且对区分铜、铅、锌等矿体异常和石墨干扰方法有效,解决了时间域激电的瓶颈问题,

收稿日期: 2017-10-10;修回日期: 2017-12-29

作者简介:包金成(1963-),男,河南南阳人,1987年毕业于桂林冶金地质学院物探专业,长期从事物探仪器的研发、应用工作。Email:baojincheng@126.com

其中,时间常数 τ_c 和矿体的结晶颗粒大小相关,结晶颗粒越小越致密则 τ 值越大,电测深 τ 等值线异常的二维断面,能和矿体产状良好对应,指示效果明显。

由于频谱激电技术复杂,仪器信号通道要求精密低漂移,信号采集要求高精度,数字信号处理需要DSP运算,所以成本较高;而信号通道采用陷波器滤除工频干扰,不仅工频干扰压制不彻底,而且滤波会导致相近频率点出现物理相移,致使测量误差加大;扫频测量所用频点多、时间长,以进口V-8仪器为例,扫频25个频点,一个轮转自动采集需35 min,加上跑极等辅助工作,完成单点测量,所用时间不小于42 min,而且接收机采集极低频信号,受大地电场和自然电位影响,电极接地条件要求比时间域激电和相位激电都严格,施工难度大。诸多因素,导致频谱激电适合室内研究和地质详查,不适合大面积的物探普查。

柯尔理论复电阻率公式展开有实部和虚部两部分,在交变电场中,实部和虚部之间存在相位差,使得地质体上测得的电位差 ΔU_{MN} 较发射电流 I_{AB} 有一定的相位滞后 φ ,当频率一定时,激电效应越强则相位 φ 越大。相位激电测量延迟相位 φ ,测量某一频率供电的延迟相位,称之(绝对)相位测量;测量不同频率的相位差,称之相对相位差测量。目前,国内研发的相位激电仪,如DJX-2/FX-1/WSJ-3,有测绝对相位,也有测相对相位,它们使用频率相干技术,即用同步信号和同步正交信号分别与测量信号相乘再滤波,得复电阻率变量的直流实变量和直流虚变量,然后相除求反切得相位,做实虚变量的均方根运算得复振幅。相比频谱激电,现有相位激电的原理有所简化,频点测量有所减少,但最低工作频点仍然在0.03 Hz。对比时间域激电,现有的相位激电仍然是原理复杂、抗工频干扰能力差、接地条件差、测点周期长,野外的实用性有待进一步提高。

目前,频谱激电和相位激电的研究成果较多,但找矿实用普及不足,矛盾的焦点主要体现在极低频信号测量。因为极低频导致:①大量的干扰信号无法排除(包括大地电场、自然电位、工业游散直流干扰、电极激化不均匀等);②接地条件差,布置电极需要深挖坑浇盐水,劳动强度大;③测量周期长;④要求仪器精密低漂移,成本高。

根据前人的研究,复电阻率 ρ 随着交变电场的频率 f 增大而减小,而相位 φ 在低频和高频时趋近与零,在频率的对数坐标上,随着不同地质体结晶颗粒形状的不同,其 τ 值和 c 值都不同,对应延迟相位

峰值 $\varphi_{\max}$ 的频率 f_c 不同,峰值两边,相位谱数值大小似正态分布。根据矿石标本测试统计,松散浸染状黄铁矿的 f_c 大于10 Hz(某细粒分散黄铁矿浸染亚黏土 f_c 在16 Hz^[3]),细脉或块状浸染硫化物矿体的 f_c 范围大概在1 Hz~10 Hz之间(某细脉含铜黄铁矿 f_c 在10 Hz^[3]),块状硫化物矿的 f_c 在1 Hz左右(辉钼矿 f_c 在1.8 Hz^[4]),致密块状硫化物富矿体的 f_c 在0.5 Hz左右(某块状黄铜矿 f_c 在0.4 Hz^[4]),而石墨相位峰值 f_c 的频率小于 10^{-2} Hz。在激电可用的频率段中,石墨的相位总是随着频率的增大而减小,当频率在 10^{-1} Hz附近,石墨和其他金属硫化物矿体的相位大小区别不大;当大于1 Hz时,石墨的相位有显著的比例减小^[4]。因此,根据找矿目标不同,野外的实际物探就可以有针对性,相位激电测量的频率点可以在相应的目标地质体的 f_c 附近工作,现场可以大幅度减少其他频率点的测量,特别是避开极低频率的频点测量,这是改善目前频谱激电和相位激电存在不足的突破方向。

根据中南工业大学的理论计算和实验^[5],在32 Hz以下频率段,金属硫化物矿体激化频谱延迟相位的绝对值随着频率的增加而增大,而石墨的延迟相位绝对值随频率的增大而减小。图1a、b为某硫化物矿与石墨的理论计算频谱曲线,图1c、d为某黄铁矿硫化物与石墨的试验频谱曲线,在频率为0.1 Hz左右,硫化物矿与石墨的绝对相位非常接近,当频率大于10 Hz时,二者反差巨大。以往常规的时间域激电,使用等间隔的脉冲方波正反向供电,宽度分别为2、4、10 s,由于方波中基频的幅度占主体,这些基频在0.1 Hz左右,物探的结果不能有效区分硫化物矿体和石墨碳质非矿,其结果也和图1显示一致。

因此,在要求避免石墨干扰和减少野外物探劳动强度的情况下,相位激电的测量频率段宜在1~50 Hz之间;在这之间,频率越低,测量信号幅度越大信噪比越高,但野外工作效率会越低;而频率越高,测量中的电磁干扰越大。正弦波相位激电所选频段为1~12.5 Hz,满足理论需求,符合野外物探实际,在这之间,单纯的石墨异常同比例显著减小。虽然相位激电频率选择趋向相位峰值频率 f_c ,但不一定就是 f_c ,需要根据找矿目标、地质环境和工作效率综合确定,较低的频率适合寻找块状金属硫化物,频率高一点适合寻找浸染状硫化物和与黄铁矿伴生的金银等贵金属。

目前我国尚没有简单可靠的绝对相位激电测量仪器,除了传统的相干技术难度大以外,其实还有一

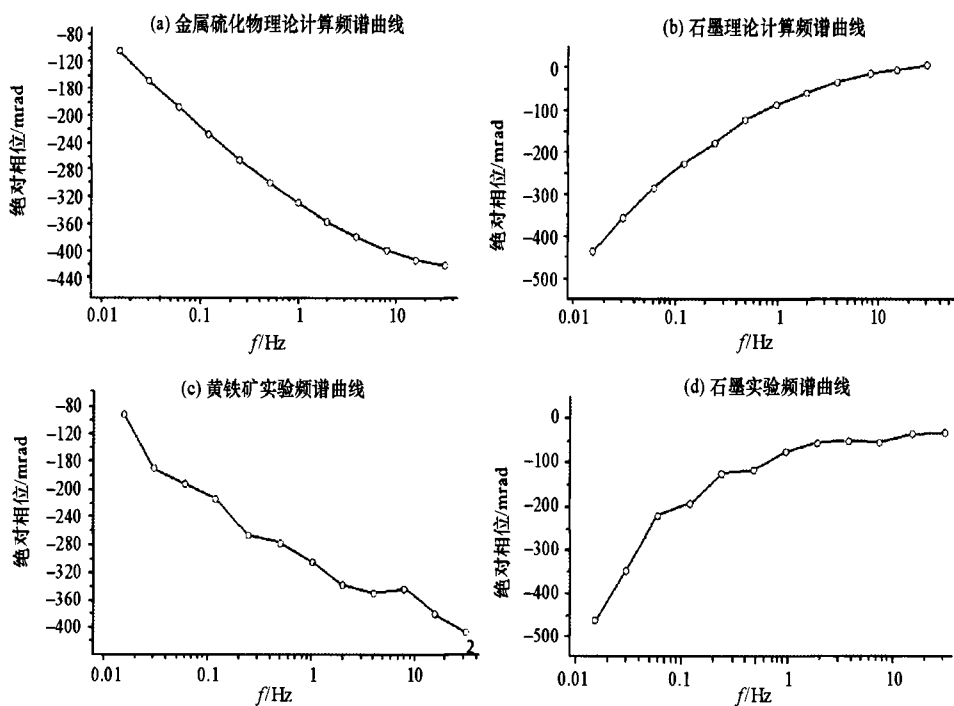


图 1 金属硫化物与石墨的频谱曲线

个关键的问题,就是没有解决和处理好既要降低 50 Hz 的工频干扰、又要避免滤波引起信号物理相移的矛盾,为了安全降低工频干扰,一般相位激电只能工作在较低的频率范围。本文的正弦波信号相位激电着重解决信号通道物理相移和大分贝降低工频干扰的矛盾问题,在这个基础上,相位激电的工作频率可以根据地质需要和野外施工需要自由设计。

正弦波相位激电的特征是:① 接收信号通道在同一时间只有一个频率的正弦波,由于频带很窄,可以用大分贝衰减滤波其他无用信号,通道滤波导致有用信号的物理相移可以补偿。② 正弦波相位激电仪既没有采用复杂的宽频段傅里叶变换技术,也没有采用传统的频率相干检波技术,其绝对相位和振幅是直接测量的。③ 正弦波相位激电接收,有配合正弦波发射的单通道相位激电仪和配合对称方波发射的三通道正弦波相位激电仪共两种子方案型号,前者串行接收单频点或多频点正弦波信号,使用公共的信号滤波通道,后者并行采集 3 个频率点的信号,每个频点各有自己的信号滤波,其信号处理的方式和单通道接收仪的方式完全一样。④ 正弦波逆变发射,发射机发射标准正弦波,可以是单频率连续发射,也可多频率组合顺序循环发射。对称方波连续发射时,根据方波傅里叶级数展开,发射机同时合成发射了基频信号 1/3/5 次谐波的正弦波,满足三通道正弦波相位激电仪可同时完成 3 个频点的绝对相位和振幅测量。⑤ 在分析符合激电目标、降低现场操作难度、减少设备成本的基础上,将正弦波

相位激电的工作频率设计在 1~12.5 Hz 的范围内,单点多频测量的时间可在数秒之间完成。⑥ 根据激电相位谱的分布规律,通过 3 个以上频点的相位 φ 测量,通过数学手段(高斯正态曲线反演或简单一元二次方程反演)近似计算 f_c 和 $\varphi_{\max}$,可以实现用最少工作量和最省力的方式,实现逼近频谱激电的物探效果。⑦ 正弦波相位激电仪,抗工频干扰和抗游散直流干扰的能力强,特别适合开展矿山(区)物探。

2 正弦波相位激电的原理

2.1 正弦波激电的物探发射

正弦波相位激电的信号发射有两种形式。一种是正弦波波形发射,可以单频率连续发射,也可以多频率顺序循环发射,发射频率 1~12.5 Hz,顺序发射时每频点连续发射 3 个周期,例如 1248 四频正弦波发射为:1 Hz、1 Hz、1 Hz、2 Hz、2 Hz、2 Hz、4 Hz、4 Hz、4 Hz、8 Hz、8 Hz、8 Hz、1 Hz、1 Hz、...,各周期在 360°和 0°之间衔接无间隔。另一种是固定频率对称方波连续发射,方波基频 1.5 Hz 或 2 Hz,由于供电方式简单,供电方波电压可超过 $\pm 1\,000\text{ V}$,容易实现大极距深度物探。

正弦波波形的激电发射机原理框图见图 2a,其中发射机组成成分前后两级开关电源,前级为输入输出高频变压器隔离升压式,控制着正弦波的输出电压,后级开关电源负责正弦波波形的逆变,为四管桥

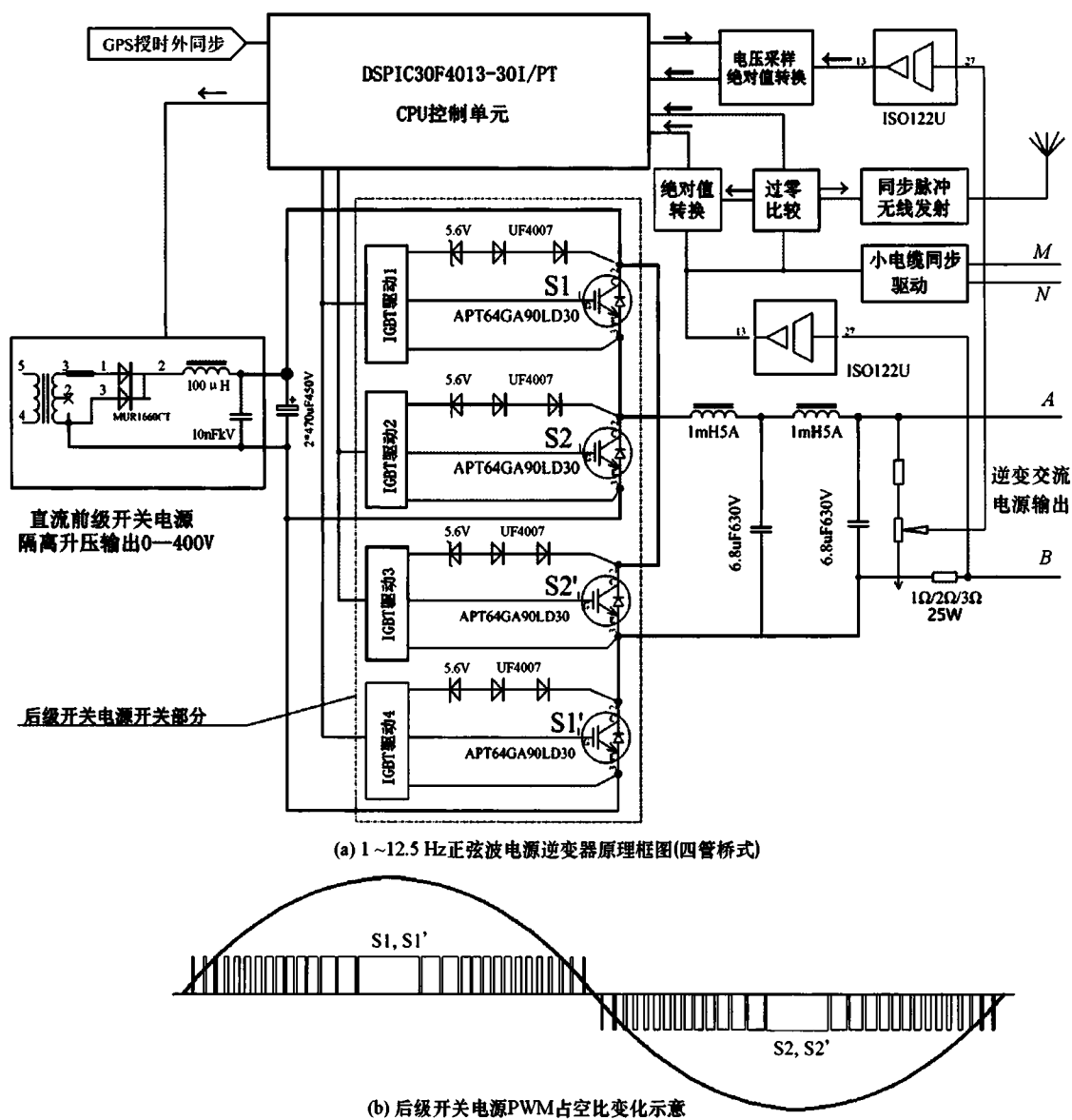


图 2 正弦波波形的激电发射机原理框图

式,其中开关管{S1,S1'}同时开关,{S2,S2'}同时开关,开关占空比见图 2b。正弦波逆变中,开关管{S1,S1'}和{S2,S2'}交替开关,0°~180°时{S1,S1'}开{S2,S2'}关,{S2,S2'}管集成的反向二极管续流,180°~360°时{S2,S2'}开{S1,S1'}关,{S1,S1'}管集成的反向二极管续流。后级开关电源输出经两级 LC 滤波,把开关电源的高频开关信号滤除,变成低频正弦波。

发射机逆变正弦波,其波形校正由单片机(配耐高温和高稳定度的石英晶体时钟源)控制完成。逆变的正弦波输出,经过无感电阻分压采样和 ISO122 运放隔离,与单片机的 A/D 信号输入端相连。单片机采集数据后,与标准正弦波的信号比对,根据比对结果,随时改变和控制后级开关电源逆变输出的占空比,以达到和保持输出的正弦波信号完整不变形。

发射机输出电流的同步信号经过分流计电流采样,用 ISO122 运放隔离并变成电压信号后,一方面经过大电流运放驱动,输出到同步小电缆,另一方面经过零比较,得到发射电流的方波逻辑脉冲。该脉冲送无线发射同步,送电流信号的绝对值转换器,也送单片机,并通过单片机控制 A/D 对发射电流信号的幅值进行采集,根据实测的电流大小,与系统设置的输出电流对比,实时反馈控制和调整前级开关电源的输出电压,保持逆变输出的电流稳定。同时,单片机不断地通过过零脉冲与 GPS 授时校对,调整输出正弦波起始相位,实时保证输出电流同步与 GPS 授时一致。

固定频率对称方波连续发射的原理见图 3。由于这种发射机一般为大功率发射机,输出功率动辄几十千瓦,因此从系统散热和方便维护和降低成本的角度考虑,前级开关电源采用两个 0~600 V 直流

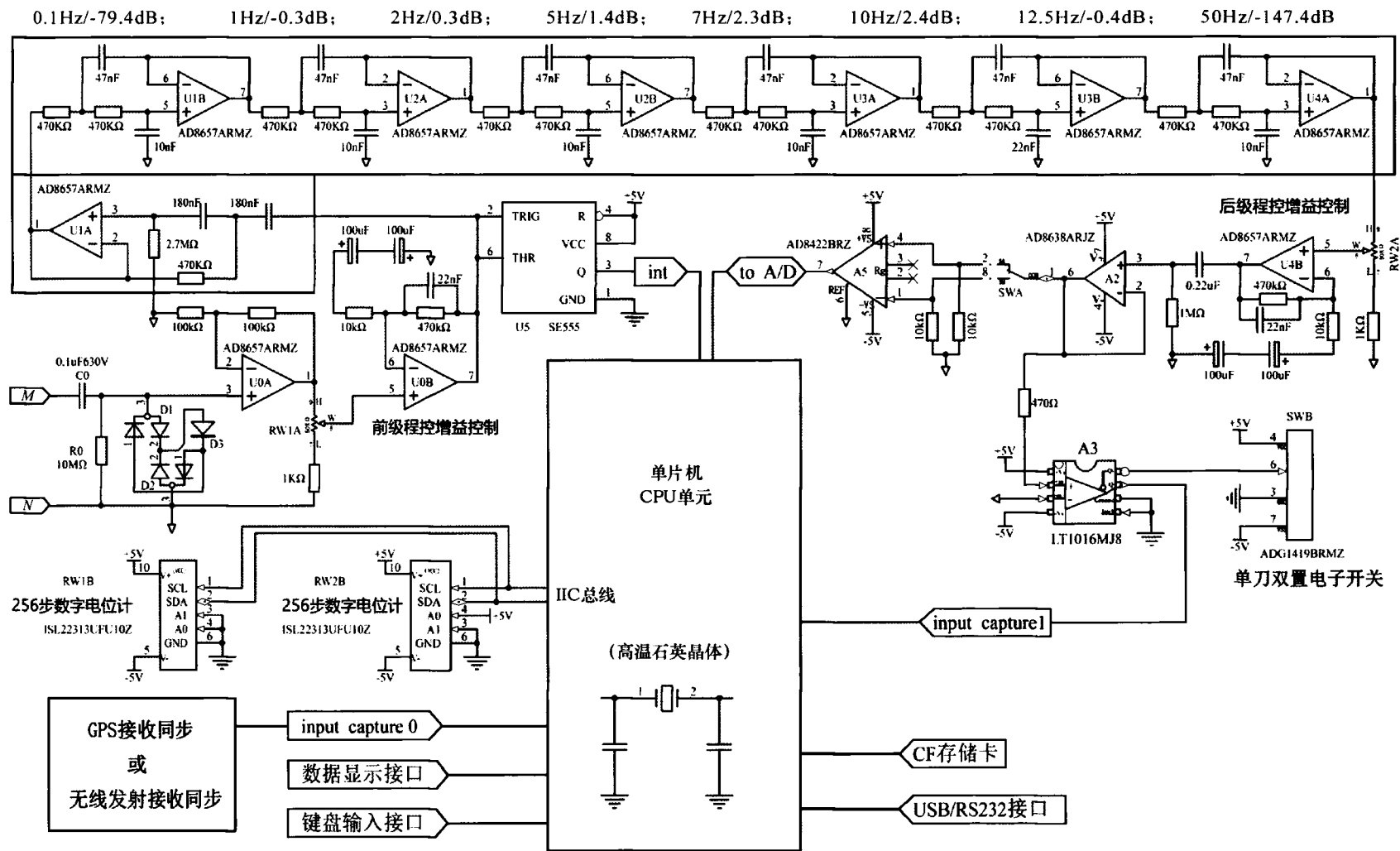


图4 单通道正弦波相位激电接收机原理

时,给单片机 CPU 提供一个下降沿的脉冲信号,CPU 根据这个信号逐级降低前级增益,使前级放大的总信号幅度小于 3.3 V;如果前级放大后的总信号里含有较高幅度的工频干扰,那么在后面的低通滤波中会尽数衰减,低通滤波器通道对 50 Hz 以上频率衰减-147.4 dB;之后有用信号的幅度减小,再经后级程控增益提高。单片机根据 A/D 转换的结果做总的自动增益控制,当 A/D 转换结果大于 3.8 V ($V_{\text{ref}}=4\text{ V}$) 时使电位计线性减档,当 A/D 结果小于 3.0 V ($V_{\text{ref}}=4\text{ V}$) 时,使电位计线性加档。经过程控增益和低通滤波输出的信号,通过隔直校零和精密运放 A2 驱动,与电子开关 SWA 及高速过零比较器 A3 相连,相位激电仪测量的正弦波信号通过过零比较后,输出和正弦波 $0^\circ\sim 180^\circ$ 相对应的高电平方波,该方波在正弦波 $180^\circ\sim 360^\circ$ 时为零电平,这个方波直接和 CPU 的脉冲信号输入捕捉的接口相连,其上升沿和下降沿的精确时间都会被 CPU 捕捉;同时,过零比较器输出方波的反相电平控制 SWA 电子开关,联合差分输入的精密运放 A5 (AD8422),将 A2 输出的交流正弦波做绝对值转换成单向直流信号,再送入单片机的 A/D 输入接口。

在接收机正常测量之前,接收机首先要捕捉 AB 供电的发射同步。当接收机工作在捕捉发射同步模式时,同步的正弦波信号经过滤波器和过零比较器变成方波信号之后,接入 CPU 的脉冲捕捉的接口,CPU 采集脉冲电平的上升和下降时间,计算出实际发射正弦波的频率及发射时刻,然后 CPU 通过修改片内定时器周期数,保持着和 AB 发射的正弦波时钟同步,而这个周期数的大小,是 32 位二进制,周期数的个数单位,是单片机指令周期,一般都能达到高频的数十兆赫兹,所以对正弦波相位的分辨率很高。由于单片机时钟是耐高温石英晶体振荡器,稳定性和精确度都很高,只要 AB 电流的相移 φ_{AB} (V_{AB} 和 I_{AB} 的相位差) 稳定不变,只要单片机运行不关机,那么单片机就和 AB 的发射信号稳定地保持着频率锁定和同步。

单片机捕捉同步之后,在接收机转入一般物探测量时,通过键盘,将接收机调到正常测量模式。在测量模式,MN 接入的信号经滤波放大和高速过零比较,一方面以方波的形式接入 CPU 的脉冲捕捉接口,通过脉冲边沿变化定位读取锁定同步信号的定时器的计数值,计算出激电相位;同时,根据捕捉的相位时间,延时 $1/4$ 发射周期,等到正弦波信号从 0° 变化到 90° 时,打开单片机的 A/D 采样,取得 ΔU_{MN} 信号的正向峰值电压,根据捕捉的相位时间,

延时 $3/4$ 发射周期,等到正弦波信号变化到 270° 时,再打开单片机的 A/D 采样,取得 ΔU_{MN} 信号的负向峰值电压,取得 A/D 采样的正负峰值平均后,与物探装置系数相乘,再除以 AB 发射供电电流,得到当前测点的视电阻率。由于在正弦波的波峰处进行 A/D 采集,信号幅度较大,不需要正弦波信号绝对值转换后的平均滤波,电阻率采集无延迟,结果是信噪比高而且速度快(图 5)。

图 6a 为单通道接收机的信号滤波通道的电路仿真曲线。其中:1~12.5 Hz 范围信号增益-0.4 dB ~ +2.4 dB,工频 50 Hz 以上频率衰减大于-147.4 dB,小于 0.1 Hz 的低频信号衰减大于-79.4 dB。因滤波的关系,测量信号的波形要滞后,信号经过滤波通道有物理的相位延迟(图 6b)。但接收机电路选用抗温度变化的元器件,经过老化处理后,滤波电路的各项参数不会随环境温度变化而改变,那么固定的频率其物理相移也是固定的;而正弦波相位激电仪的滤波通道只有固定频率的正弦波,而且测量同步和小电缆同步获得的发射同步信号,和在各测点测量的是同频信号,都经过了一个公共的滤波通道,其物理相移相同,在单片机上自动补偿抵消;因此,这种通道滤波不会对测点激电相位的测量结果产生影响,这是正弦波相位激电接收机的特点。

正弦波相位激电接收机有 4 种方式获得发射信号源的同步信号,按优选顺序,分别是接收获得无线发射同步、接收 GPS 同步、接入小电缆同步、测量同步,前两种为数字脉冲信号,与单片机的脉冲接口直接相连,后两种为模拟信号,通过 MN 端口和信号滤波通道输入。测量同步是在其他同步方式都不方便使用的情况下,现场简易处置的一种特殊方式:将接收机设置成测量同步的模式,在强场源区公共的物探背景异常点,通过 MN 电极接地测量获得的发射同步。小电缆同步是系统的基本同步方式,其测量方式也是在测量同步模式下,但 MN 输入的是发射机端引出的小电缆信号;小电缆信号是发射机采样和隔离输出的发射电流波形信号,信号的大小为峰峰值 1~2 V,小电缆的末端有一个 $100\ \Omega$ 的匹配电阻。无线发射同步和 GPS 同步可保持接收机的同步实时更新,比如在测量跑极的过程中联系同步,不影响正常的测量时间,但这两种同步,使用前必须经过用小电缆做物理相移刻度,刻度数值被单片机掉电保存;相位激电测量中,单片机将无线同步或 GPS 同步接收到的逻辑时刻与刻度的物理相移相加,然后再与各测点不同频率的正弦波过零比较信号的逻辑时序比较,得到各测点不同频率的绝对相位。

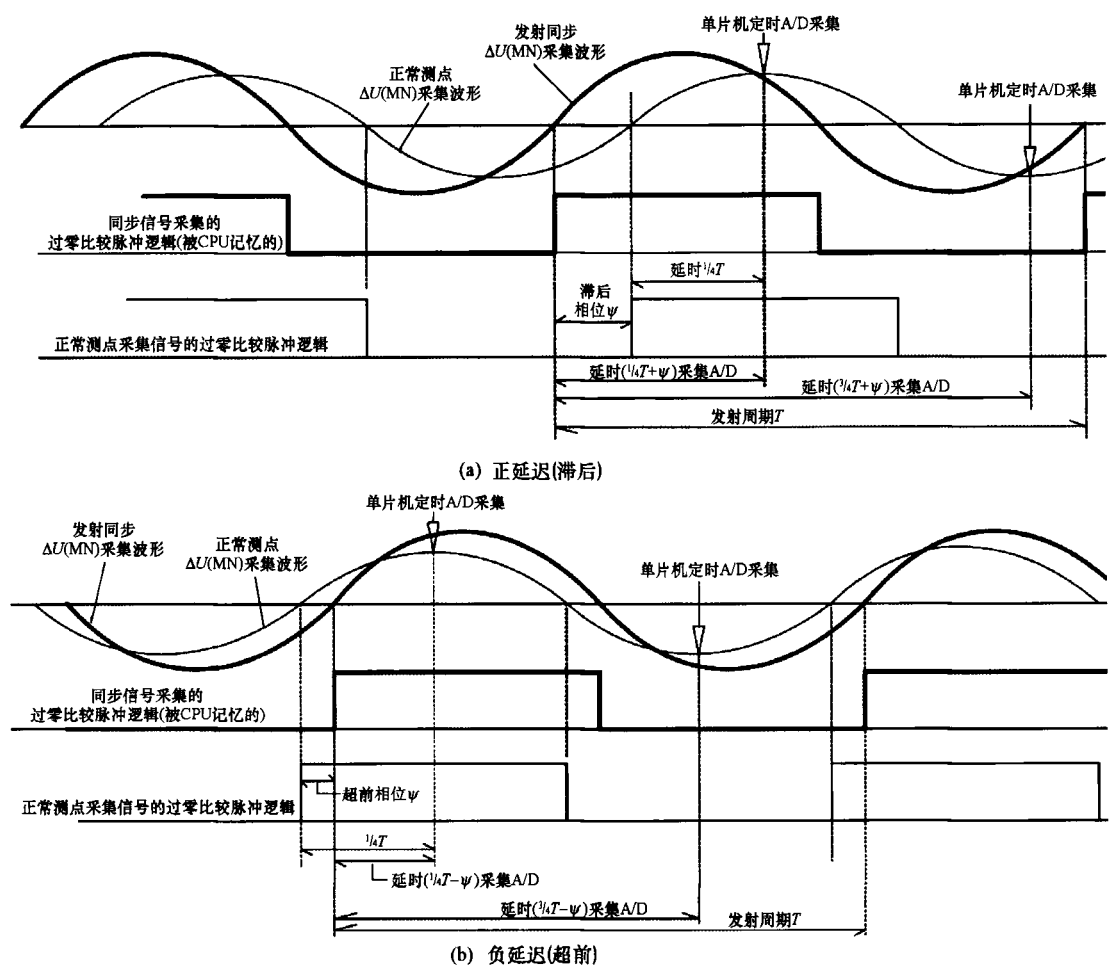


图 5 正弦波激电相位延迟采集时序

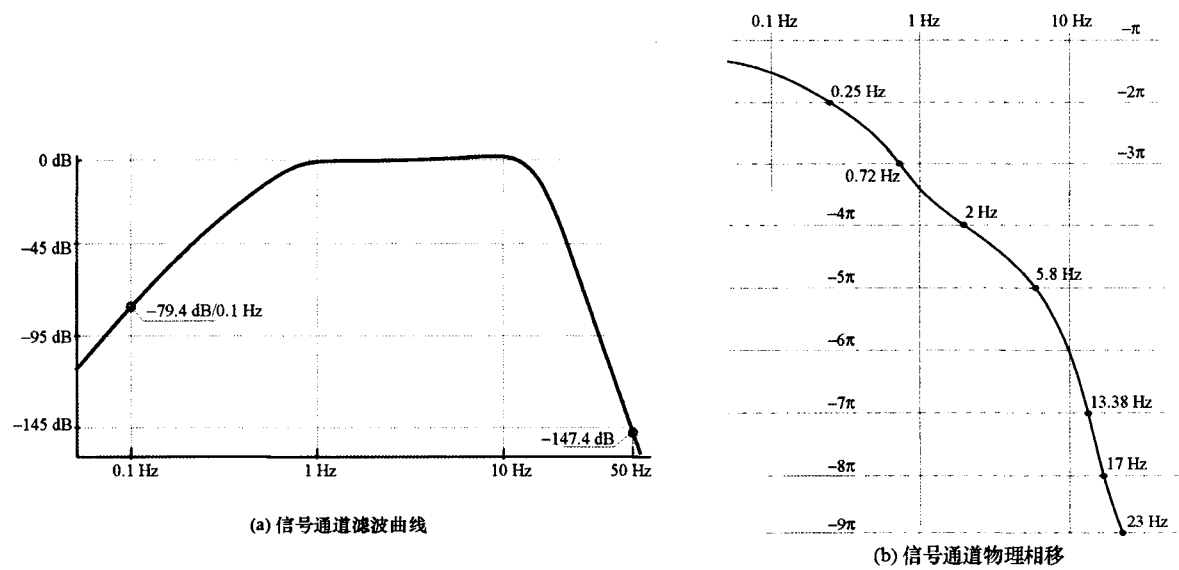


图 6 单通道正弦波相位激电仪信号通道特征

在相位激电测量过程中,如果 AB 供电电极接地较好,相移 φ_{AB} 稳定不变,那么接收机获得同步后,只要发射机和接收机都不关停,后续测量中发射机和接收机都通过石英钟保持频率锁定和同步一致,接收机无需再寻找同步。石英钟经过出厂调校,其同步误差在许可范畴;如果使用无线同步或 GPS 同步,即便是因为山谷地形等影响无线同步的信号传递,或因密林、因坑道等遮挡原因影响 GPS 的接收,也不会影响激电测量的正常进行。测量中,如果在每一个测点都做小电缆同步或无线发射同步或 GPS

同步,可使正弦波相位激电在 AB 电极接地条件稍差、 φ_{AB} 相位漂移不稳定的情况下也能够正常工作;如果 φ_{AB} 相位漂移不稳定,同时又不方便做无线同步和 GPS 同步和小电缆同步,那么可以用另外一台接收机在发射机附近实时监控测量小电缆的 φ_{AB} 参数,根据时间轴记录,可以对其他接收机采集的相位参数进行室内改正处理,这样正弦波相位激电仍然能够正常开展。

2.2.2 三通道正弦波相位激电仪:

对称方波发射的频率为 $1.5\text{ Hz}/2\text{ Hz}$,其傅里叶级数展开有基频 $1.5\text{ Hz}/2\text{ Hz}$ 、三倍频 $4.5\text{ Hz}/6\text{ Hz}$ 、五倍频 $7.5\text{ Hz}/10\text{ Hz}$ 、七倍频 $10.5\text{ Hz}/14\text{ Hz}$ 、...等多次谐波的正弦波,但除了一、三、五倍频信号的幅值较大以外,其他高次谐波的幅度占发射机输出功率很小一部分,可以忽略。三通道正弦波相位激电仪利用发射机发射的一、三、五倍频的正弦波信号进行测量,可同时得到 3 个频点的视电阻率 ρ_s 、视绝对相位 φ_s 。

三通道正弦波相位激电仪采集 3 个频点的信号,分别通过 3 个专用的十阶巴特沃兹窄带滤波器

通道。如:接收发射 1.5 Hz 的方波时,设计第一通道滤波器通带 ($-3\text{ dB at } 700\text{ mHz}$),阻带 ($-40\text{ dB at } 1.8\text{ Hz}$),大于 4.5 Hz 的信号衰减大于 -75 dB ,小于 0.35 Hz 的信号衰减大于 -95 dB , $0.9\sim 2\text{ Hz}$ 范围内的信号增益 (1.7 ± 1) dB ;设计第二通道滤波器通带 ($-3\text{ dB at } 700\text{ mHz}$),阻带 ($-45\text{ dB at } 2\text{ Hz}$),中心 4.5 Hz 信号增益 3 V/V 倍, (4.5 ± 0.3) Hz 范围内增益 $+9.0\text{ dB}\sim +9.6\text{ dB}$,对频率小于 2.8 Hz 和大于 7.2 Hz 的信号衰减均大于 -70 dB ;设计第三通道滤波器通带 ($-3\text{ dB at } 1\text{ Hz}$),阻带 ($-40\text{ dB at } 2.6\text{ Hz}$),中心 7.5 Hz 增益 5 V/V 倍,对频率小于 4.5 Hz 的信号衰减大于 -73.38 dB ,对 10 Hz 的信号衰减大于 -44 dB ,大于 12 Hz 的衰减大于 -68 dB 。图 7 为三通道滤波参数和通道物理相移的仿真曲线,图 8 为三通道正弦波相位激电仪接收机的整机电路。

三通道正弦波相位激电仪对独立的 3 个信号通道分别各自同步,分别做信号滤波,分别进行程控自动增益,分别进行正弦波信号高速过零比较,分别做用电子开关倒相来完成绝对值转换,并分别在正弦波 90° 和 270° 时进行 A/D 转换,3 个通道 3 个频点

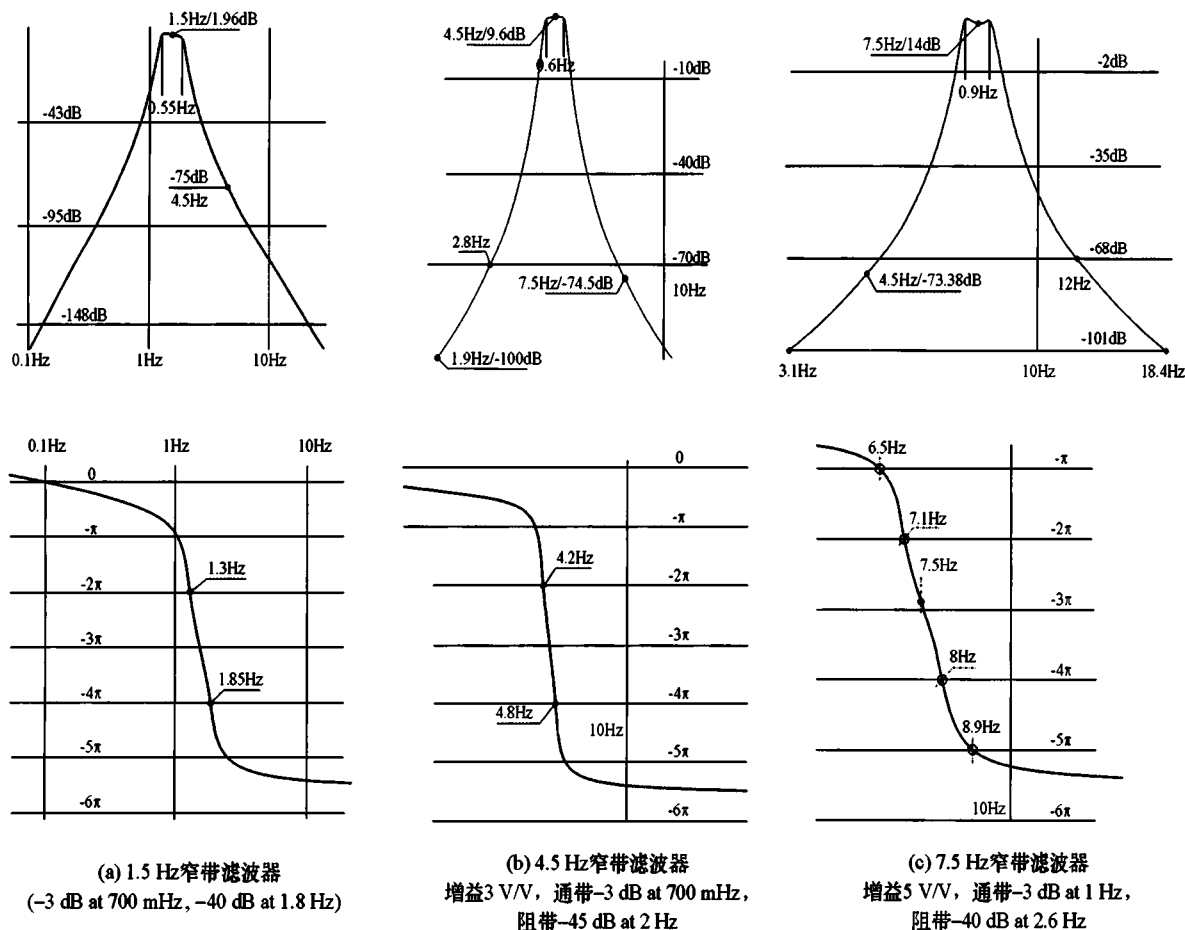


图 7 三通道滤波参数和通道物理相移的仿真曲线

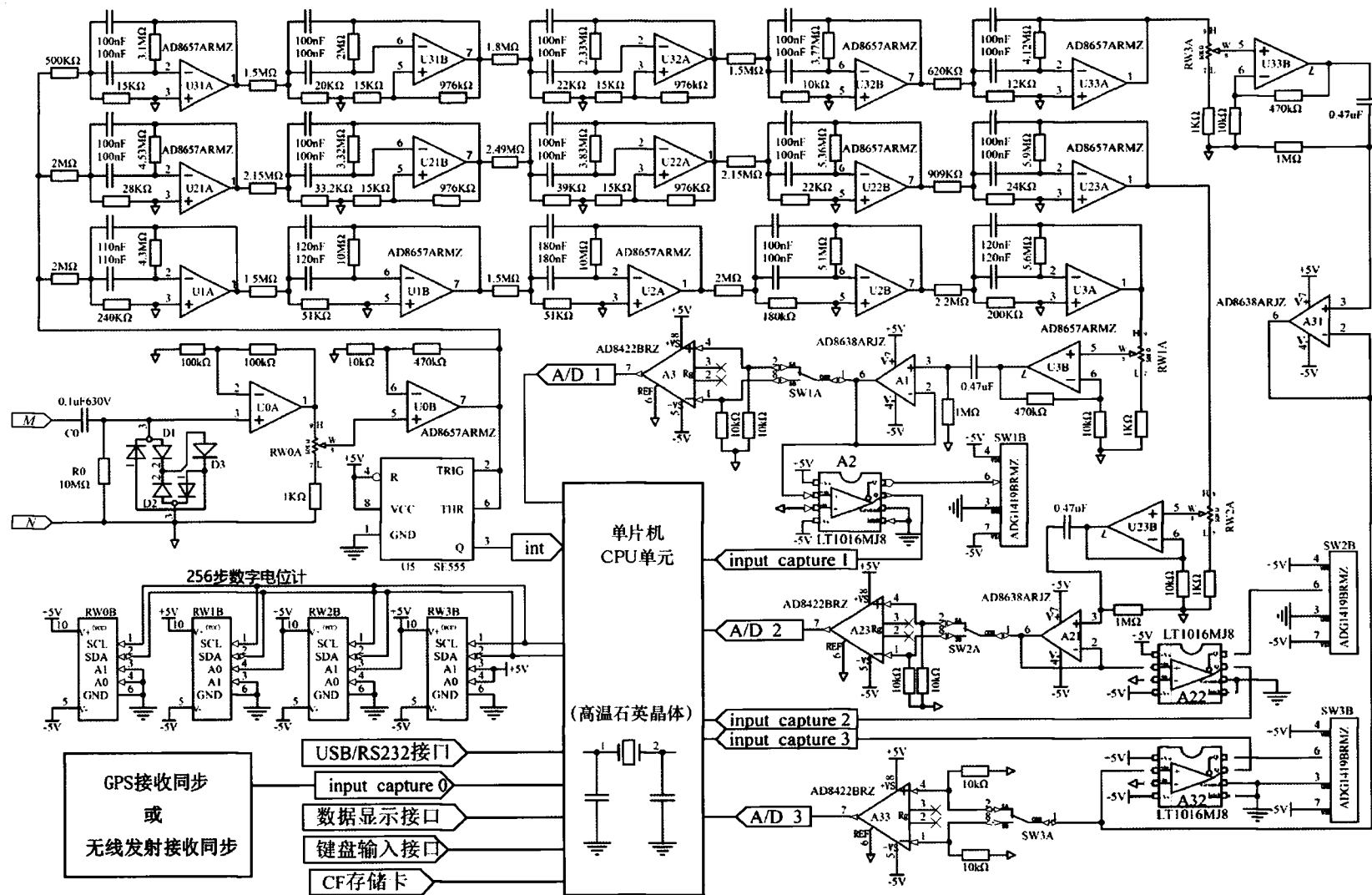


图8 三通道正弦波相位激电接收机原理

的激电相位和振幅(转电阻率)的数据采集方式和单通道正弦波相位激电仪的完全一样。

三通道正弦波相位激电仪单纯使用小电缆同步,其要求和操作与单通道相位激电仪一样;如果启用无线同步或 GPS 同步信号,也和单通道相位激电仪一样,使用前必须经过小电缆物理相移刻度;但是,对称方波发射的无线同步和 GPS 同步,是发射脉冲的电压 V_{AB} 信号同步(不是 I_{AB}),刻度的数据包含有 φ_{AB} 变量,而 φ_{AB} 随 AB 供电电极接地不同而不同,所以每次 AB 电极接地改变后,三通道相位激电接收机要重新做小电缆刻度,综合校订三频点的(φ_{AB} +物理相移),或者需要用某一接收机对小电缆做三频点的 $\Delta\varphi_{AB}$ 测量,测出 AB 电极接地改变后三个频率点 φ_{AB} 的变化量,然后对所有接收机采集的 φ_s 参数做偏移修正。

3 相位激电仪器研究的现状

20 世纪 60 年代,前苏联最早研制相位激电仪器^[3]。哈萨克地球物理仪器厂曾经研制出 ИНФАЗ ВЛ 车载基站和 ВЛ-Ф 轻便基站,前者可以完成电场、磁场的绝对相位测量和两种频率的相对相位测量,后者只能完成两种频率的相对相位测量。前苏联的激电发射采用可控硅单频脉冲方波发射,测量中使用方波的一次和三次谐波。测量两个频点的相对相位差时,他们使用了一种近似计算的方法,在基频余弦值近似等于 1 和基频正弦值与频率弦角近似相等的条件下,以一种特殊的手段,计算三次谐波与一次基频谐波的相对相位差,计算相对相位差时,不需要发射同步基准。接收机用两个信号通道,同时滤波选频两个频率点,一个选频发射方波的基频并压制方波的三次谐波,另一个选频三次谐波并压制基频,然后两个频点的信号各自整形为方波;之后两个通道相互比较各自方波边沿的时序,在石英振荡器和脉冲模拟计数的条件下测量相对相位。每个测点的相对相位需要多次重复测量并累计平均,累计算子 2~256 次。ИНФАЗ ВЛ 基站进行绝对相位激电测量时,每次测量一个频点,无线发射的同步逻辑,在发射基站经过对发射电流采样的选频处理,针对方波基频或三次谐波;接收机在测量绝对相位时,先将无线同步导入接收通道,测出相位底数,然后再将测点信号导入接收通道,测出经过底数补偿的绝对相位。

ИНФАЗ ВЛ 和 ВЛ-Ф 相位激电仪对工频干扰有选择性地滤波或不滤波,在没有工频干扰的地方,信

号直通滤波模块不介入,有干扰时滤波模块介入,并压制 50 Hz 信号-40 dB(1/100)。

前苏联的相位激电测量,依仗石英晶体振荡器模拟计数和机械手动开关繁琐切换的使用方法,在当时的技术条件下制造出了比较先进的设备,在野外进行了大量成功的实践,并在相位激电的发射和接收的多种供电与测量的物探装置方法上进行了系统的研究,A.B.库里科夫和 E.A.舍米亚金合著《相位激发极化法》^[3]对我国相位激电的发展起了重要推动作用。苏联人相位激电的原理清楚、方法简单、设备笨重、测量以经验公式为先导,使用非常落后的电子技术,放在现在已经完全不适合;但其方法简单,和正弦波相位激电的思想一致,其野外实践结果对正弦波相位激电有重要的借鉴作用。

我国 90 年代曾研制过 DJX-1/2 幅相仪^[6],没有推广,其测量参数是视电阻率 ρ_s 和绝对相位 φ_s ,可选工作频率 0.1 Hz、0.3 Hz、1 Hz、3 Hz、10 Hz、30 Hz、100 Hz,最大发射电压 150 V,功率只有 40 W,最大接收信号幅度 16.7 mV,使用中大部分测点信号小于 1 mV,信噪比严重不足。在矿区的实际应用中,在高频时出现背景相位异常偏高和矿体上方出现负相位的问题,推测其系统物理相移处理不彻底(包括接收机通道物理相移、 AB 供电的发射电流相移 φ_{AB} 等),致使矿异常上测量的延迟相位超过 180°,导致低频正常但高频有虚假相位负延迟(超前)的现象出现。

FX-1 型幅相仪^[7]是时间域激电向频率域激电发展的一个中间典型,它连续发射频率小于 0.25 Hz 的单频矩形波(对称方波),因为有了时间域激电的停电间隔,测量的时间效率有所提高,测量参数有时间域的激化率 η_s 、电阻率 ρ_s 和频率域的绝对相位 φ_s 。由于 FX-1 在 10^{-1} Hz 频段测量,所测极化率 η_s 和相位 φ_s 的性质相仿,有用信息提升不多,并面临和时间域激电一样的瓶颈问题,对区分硫化物矿异常和石墨碳质干扰没有实质意义。

现在国内常用的相位激电仪器主要是中南工业大学的三频、五频相位激电仪,测量不同频率的振幅 F_s 和相对相位差 $\Delta\varphi_s$,其中最新型的 WSJ-3 五频激电仪在 0.031 25~8 Hz 范围内划分 9 个频点(8 Hz, 4 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 0.5 Hz, 0.25 Hz, 0.125 Hz, 0.062 5 Hz, 0.031 25 Hz)并划分 5 组,每组均是以相邻 5 个频点为一组,每次发射选其中一组,将五频点以伪随机二进制的形式组合,按正负方波恒流脉冲发射。接收机对宽频带的信号,经过抗工频干扰的信号滤波后,采用频率相干检波技术,对选择发射的一组五频点

宽带信号分十路做相干处理,其中每一个频点有两路相乘的相干信号,分别是该频点同步信号的正弦波和余弦波(或用同步逻辑和同步正交逻辑分别做电子开关快速倒相),相乘后积分滤掉交流信号,得该频点的直流实分量(同步相乘结果)和直流虚分量(正交相乘结果),然后经 A/D 转换,在 CPU 内做实虚除法运算和反正切运算,得该频点的激电相位,再做实虚均方根运算得复振幅。WSJ 相位激电的测量结果,通过高频段的相对相位差和与低频段的相对相位差对比,可以区分硫化物异常与石墨干扰,解决了时间域激电的瓶颈问题,在野外物探中应用较好。但是,由于 WSJ 激电仪和频谱激电仪一样,要在宽频段内采集极低频等多频混叠信号,电极接地条件差和现场劳动强度大的主要缺点没有改善,而且仪器要用积分滤波消除频率相干后的交流信号,这种办法因极低频信号处理测量周期长、物探测量速度慢,改良空间较小,虽然仪器成本稍有降低,但对比频谱激电没有技术优势。

目前国内有使用进口仪器做相位激电测量的,如 V-8 和 GDP-32 II 多功能电法仪器。实际上它们虽然做相位激电测量,叫法上仍称之为 CR(复电阻率)或 SIP(频谱激电)测量,因为不管是测量 φ_s 的相位激电或是测量 ρ 、 m 、 τ 、 c 的频谱激电,其数据采集方式和数据处理实质上是一样的,输出不同的参数仅因为使用软件的输出模块不同而已,在设备成本和工程造价上没有区别。例如 V-8 仪器,最快单测一个频点 1 Hz 的相位需时间 1 min,实际使用时要测多个频点,累计总耗时和频谱激电一样,所以使用进口型号的多功能电法仪器做地质普查性质的相位激电测量,从经济上很不划算。

4 正弦波相位频激电的优点

1) 正弦波相位激电具有原理简单快捷、设备经济实用、仪器轻便、数据采集速度快的特点。由于 AB 电极发射频率较高,物探单点测量可以在数秒内完成,比较其他激电仪,至少提高 10 倍以上的工作效率。

2) 正弦波相位激电工作频率大于 1 Hz,可有效排除石墨碳质干扰,对金属硫化物矿体的相位反应灵敏。

3) 正弦波相位激电,其接收机的相位采集不受通道滤波影响,数据采集准确可靠。

4) 和其他频谱激电和相位激电不同,正弦波相位激电的信号发射是以稳压源的方式发射的。正弦

波发射不存在任何高频信号,对称方波发射,因为没有采用其他激电采用的恒流源方式,在脉冲方向改变时,因电流突变导致的电压尖脉冲辐射、和辐射引起的电磁干扰显著减小。正弦波相位激电接收信号的频率在 1~12.5 Hz 之间,其他信号不被关注,也不受影响,可避开任何高频尖脉冲辐射的影响,所以正弦波相位激电不仅绿色环保,而且对电磁干扰的抗噪和适应能力强,能在强工频干扰和强游散直流干扰地区正常工作,适合矿山物探。

5) 正弦波相位激电的信号发射与接收的同步方式,比其他频谱激电和相位激电的都灵活,而且无线同步和 GPS 同步的方式,受外界条件的变化影响小,对各种现场的适应能力强。

6) 由于采用全交流测量,正弦波相位激电自动排除了直流和极低频不稳定因素的影响,其接地条件比频谱激电、其他相位激电以及时间域激电的要求都低,现场操作的电极安装速度快、质量好。

7) 对称方波发射的正弦波相位激电的设备成本低、功率大,方便做大极距深度物探。

5 结论

正弦波相位激电是在总结现有频谱激电和相位激电优缺点的基础上,本着便宜操作的需要提出的一种新方法,其测量速度快、接地条件相对要求低,具有简单快捷、经济高效的特点,可作为频谱激电的重要补充,有望替换现有的相位激电,为地质普查和详查的找矿服务。

正弦波相位激电适合矿山(区)物探。现有的频谱激电和相位激电只能在矿山(区)停止工业用电的‘午休时间’开展地面物探,而正弦波相位激电可在工业电网、轨道交通、升降电梯、电磁起重的环境中开展激电工作,不仅能做地面物探,也可以在不可能停止工业用电的深部坑道开展井下激电,现场指示储矿空间,引导坑道生产。

由于基于低频正弦波,正弦波相位激电对尖脉冲电磁干扰信号不敏感,相关的电磁耦合干扰校正和其他恒流脉冲供电的相位激电有多大区别需要进一步分析研究。另外,该项研究的一个新课题,就是怎样用最少野外工作量和最省力的方式获取最大的权值。本文提出用 3 个以上频点的绝对相位和电阻率的测量,近似反演最大相位和它对应的频率,是否有其他更好的办法来准确反演,建议有兴趣的同行来进行研究、论证。

参考文献:

[1] 何继善, 柳建新. 伪随机多频相位法及其应用简介[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(2): 374 - 376.

[2] 张宪润, 陈儒军. 激电相对相位法区分矿与非矿异常的成功实例[J]. 物探与化探, 1998, 22(4): 251 - 254.

[3] 库里科夫 A B, 舍米亚金 E A. 相位激发极化法[M]. 北京: 地质出版社, 1984.

[4] 闫宝旺. 浅覆盖区快速扫面的电法仪器——阵列电磁多频相位激电仪 (DEM-IP-II) [J]. 甘肃科技, 2013, 29(5): 42.

[5] 夏训银. 多频激电相对相位法数值模拟和物理模拟研究[D]. 长沙: 中南工业大学, 2000.

[6] 幕文斋. 智能化相位激电勘察仪器的设计研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2001.

[7] 叶树民, 常守恩, 吴守七. 激电绝对相位测量及时频激电多参数同时测量的技术方案[P]. 中国: CN1673776A, 2005-09-28.

The sine wave phase IP method

BAO Jin-Cheng

(No. 3 Geological Party, Henan Bureau of Geology and Nonferrous Metals Mineral Resources, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In this paper, according to the problems existent in spectrum IP and phase IP work, the authors put forward a new method of sine wave phase IP. By using the narrow-band filter based on single frequency sine wave signal, the interference can be attenuated by large db, and phase shift of fixed frequency filter can be compensated. In the case of sinusoidal waveform locking, IP absolute phase can be carved directly and read with single-chip microcomputer counter. The resistivity is calculated by A/D acquisition amplitude positioned at sine wave peak. The sine wave phase IP working frequency is 1Hz ~ 12.5Hz, and it has the advantages of simpleness and quickness, low equipment cost, relatively low electrode grounding requirement, rapid geophysical prospecting measurement, and strong capability of anti-power frequency harassment and anti-stray DC interference. This method is especially suitable for mine geophysical prospecting, which can overcome the disadvantages of current frequency domain IP such as high cost, low efficiency and unsuitability for fault survey. The method expands the new applications in the mine production.

Key words: phase-IP; sine wave; signal synchronization; physical phase shift

(本文编辑: 沈效群)