

向浩轩,付国红,杨天春,等.天然电场选频法动静态信息采集与处理方法[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2024,39(1):1-10. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.01.001

XIANG H X, FU G H, YANG T C, et al. Natural Electric Field Static and Dynamic Signal Acquisition and Procession Methods [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(1):1-10. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.01.001

天然电场选频法动静态信息采集与处理方法

向浩轩¹,付国红^{1,2*},杨天春¹,程辉^{1,2},何梦琪¹

(1.湖南科技大学 深海深地矿产资源开发技术与装备教育部工程研究中心,湖南湘潭 411201;

2.广西隐伏金属矿产勘察重点实验室,广西桂林 541006)

摘要:天然电场选频法在浅层地质勘探尤其是地下水资源勘探应用广泛,而目前运用选频法寻找地下水时仅利用选频法静态信息进行剖面测量,忽略了动态信息对辅助确定井位的作用,为此设计一种密频点的信号采集及动态信息提取方案.在湖南浏阳大围山地质公园内进行寻找基岩裂隙水实践中,与湖南继善高科技公司SQ-5型双频激电仪进行对比实验,实验结果表明:2台仪器观测结果吻合良好,并利用动、静态信息成功验证了井位,证明本系统设计的可行性、可靠性,在资源勘察、工程物探,尤其是在寻找地下水资源方面应用前景广阔.

关键词:地球物理;天然电场选频法;信号采集;动态信号;地下水勘探

中图分类号:P641.7 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2024)01-0001-10

Natural Electric Field Static and Dynamic Signal Acquisition and Procession Methods

XIANG Haoxuan¹, FU Guohong^{1,2}, YANG Tianchun¹, CHENG Hui^{1,2}, HE Mengqi¹

(1. Engineering Research Center of Advanced Mining Equipment, Ministry of Education, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Concealed Metal Mineral Exploration, Guilin 541006, China)

Abstract: As a passive geophysical exploration method, natural electric field frequency selection method is widely used in superficial geological exploration, especially in groundwater exploration. So far, the static information has been used to make profile measurement when the method of frequency selection is applied to search for groundwater, ignoring the effect of dynamic information in determining well location. Therefore, this research designs a dense frequency signal acquisition and dynamic information extraction scheme. A practice of searching bedrock fissure water is made at Daweishan geological park in Liuyang city, Hunan province, compared with SQ-5 dual-frequency induced polarization apparatus produced by Hunan Jishan high-tech Co., Ltd. The contrast experiment result shows that two instruments observation results agree well, which proves that the design of this system is feasible and reliable, and has a broad application prospect in resource exploration, engineering geophysical exploration, especially in searching groundwater resources.

Keywords: geophysics; natural electric field frequency selection method; signal acquisition; dynamic signal; groundwater resources search

收稿日期:2020-04-01

基金项目:国家重点研发计划项目资助(2022YFF0706200);国家自然科学基金资助项目(42074219);湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ3024);广西隐伏金属矿产勘察重点实验室开放基金联合资助

*通信作者, E-mail: fghesu@163.com

我国水资源总量约为 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 人均占有量仅为 $2\ 300 \text{ m}^3$, 约为世界平均水平的 $1/4$ ^[1], 同时存在水资源南北分布不均, 水与人口、土地资源分布不均、与经济社会发展格局不匹配等问题^[2]. 据全国地下水资源与环境调查表明: 我国地下淡水资源天然补给量每年为 $8\ 840 \times 10^8 \text{ m}^3$, 开采量每年为 $3\ 530 \times 10^8 \text{ m}^3$, 全国地下水资源开发利用潜力较大^[3], 地下水资源作为水资源的一个重要来源, 尤其在北方某些缺水地区, 如河北平原, 地下水开采量占总供水量 70% 以上^[4]. 因此研究高效、廉价的寻找地下水资源方法便成为一项重要课题.

天然电场选频法(简称选频法)是一种由大地电磁法发展而来的地球物理勘探方法, 以地下岩(矿)石的电性差异为基础, 通过观测地面上 $1 \text{ Hz} \sim 2 \text{ kHz}$ 的水平方向电场分量的变化规律, 研究地下断面的电性变化^[5]. 相对于常规电法而言, 选频法所需设备轻便、工作效率高^[6], 特别适合用于地形复杂、植被发育的山区或建筑密集的城镇开展水文地质工作^[7]. 韩荣波等^[8]总结了选频法野外勘探工作的基本程序, 利用选频法静态信息, 取大地电场的幅值作为测量值, 从而计算视电阻率, 进而获得异常点位置、深度等信息; 杨天春等^[9]通过正演分析深入探讨选频法测深异常的成因, 从理论上更好地指导地下水勘探工作; 王齐仁^[10]以麦氏方程出发, 从电磁波传播的角度分析天然交变电场的动态信息, 解释其成因及特点; 周华等^[11]从磁流体的角度解释选频法的异常成因, 探讨用动态信息解决某些地质体与水都具有低阻异常的共性而导致找水失败的问题; 杨荣丰等^[12]针对选频法动态信息对地下径流的形成、特征进行研究, 提出通过选频法动态信息直接反映地下流动水, 进行确定地下径流通道位置的勘探新思路.

目前, 对动态信息大多停留在理论研究的阶段, 缺乏相应观测设备, 无法定量对动态信息进行计算而造成误差较大. 本文设计一种连续时间波形的信号采集与分析平台, 通过数字信号处理方法和数理统计方法对动态信息进行定量计算, 并统计出各测点上各频点的动态信息大小. 寻找基岩裂隙水实践表明, 利用静态信息确定破碎区域, 利用动态信息成功验证井位, 证明本系统设计的可行性、可靠性, 及在寻找地下水资源方面具有广阔前景.

1 方法原理

选频法在实践运用中, 可依据两部分信息对观测数据进行分析与解释, 即静态信息和动态信息. 静态信息为大地电场的幅值, 由于介质之间存在的电性差异相对稳定, 地表的电磁响应也相对稳定, 故其反映的是地质形态变化综合值; 动态信息则反映地下电磁场能量载体(如水体)所在空间磁通量的变化, 具体而言, 动态信息是由地下水体的移动方式、速率变化, 导致地下介质中传导电流的不稳定, 从而在幅值上存在不断变化的现象.

以往的研究者在观测天然电场动态信息时, 通过观察指针的摆动幅度、频率来记录动态信息, 在读数时仅通过人眼观测指针的摆动, 并手动记录, 由此造成读数误差大, 甚至不准. 且在多频点同时观测时, 需要同时记录多频点动态信息, 造成需要更多的人员来进行读数的问题. 而对于现场直接生成结果的仪器, 目前未见有动态信息分析功能报道, 无法对动态信号进行分析. 针对上述问题, 本文从选频法静态信息与动态信息成因出发, 给出静态信息与动态信息相应计算公式, 并详细介绍信号采集与数据处理方法.

1.1 静态信息

由于天然电场选频法是从音频大地电磁法发展而来的一种方法, 原理可以用大地电磁法进行分析. 其一次场源为宇宙中太阳风、磁暴、雷电等, 且选频法在一定条件下可将工业游散电流作为场源^[13]. 在将大地视为各向均匀无磁性介质、场源为垂直于地面的平面电磁波条件下, 可以得到天然电场的趋肤深度 δ 为

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}. \quad (1)$$

式中: ρ 为地下介质的电阻率; f 为工作频率. 显然趋肤深度随介质的电阻率增加而增大, 随频率的增加而减小. 尽管上述趋肤深度不能 1:1 对应勘探深度, 但可以定性地表示勘探深度. 而对于同一观测点, 地层的电阻率不变, 可以通过选用不同工作频率的方法来达到不同勘探深度的目的^[14].

大地电磁法给出非均匀介质条件下,以实测阻抗计算出的量程为卡尼亚电阻率,如式(2)所示.

$$\rho = \frac{1}{\mu\omega} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2. \quad (2)$$

式中: μ 为介质的磁导率; ω 为测量角频率.由于天然电场选频法只测水平电场分量,同时为了将式(2)作为天然电场选频法异常解释的定性分析公式,可以把磁场分量 H_y 简化为一个定值,同时忽略磁导率的变化^[15],将卡尼亚电阻率 ρ 简化为视电阻率 ρ_v , 如式(3)所示.

$$\rho_v = \frac{1}{5f} (E_x)^2. \quad (3)$$

由式(3)可知:观测获得的电场强度 E_x 越大,视电阻率值越大,说明此处地下介质导电性较差,属于高阻地层质,反之若 E_x 越小,则说明此地属于低阻地层质.

1.2 动态信息

均匀各向同性介质在交变电磁场的作用下,存在不同性质的传导电流 j_c 和位移电流 j_w :

$$j_c = \frac{1}{\rho} E_0 e^{i\omega t}, j_w = \frac{\varepsilon f}{2} E_0 e^{i(\omega t + \pi/2)}. \quad (4)$$

式中: E 为电场强度; ρ 为电阻率; ε 为介电常数; f 为电磁波频率.传导电流由介质中自由电荷的移动形成,电流密度由介质电阻率决定.而位移电流则是由介质的介电极化现象所产生,其大小与介质的介电常数与电磁波频率相关.由于地下裂隙或孔隙中溶液的运移方式不同、速率不均匀,导致溶液中导电粒子的含量时多时少,速率时快时慢,使得整个地下水介质的传导电流极不稳定,尤其是高频状态下的位移电流随时间产生不规则变化^[16].而流体在天然电磁场的作用下发生相对运动,切割天然交变电磁场中的磁力线,产生复杂的感应电磁场,从而在地表产生不稳定的电磁响应.对指针型天然场选频仪而言,动态信息体现在实际观测中指针的频繁摆动、读数不稳定.

由于均方差在数值统计中是衡量一组数据离散程度的度量,而选频法的动态信息则是通过信号的幅值变化情况来看体现的,动态信息强对应信号变化的幅度与频率大,也代表着数据偏离程度较大,故通过计算均方差表示动态信息的方式是可行的.

2 整机设计方案

针对此问题采用“下位机信号采集—上位机信号处理”的解决方案,下位机将经调理的信号转换成数字量发送给上位机,在上位机中进行数据处理,系统原理框图如图 1 所示.

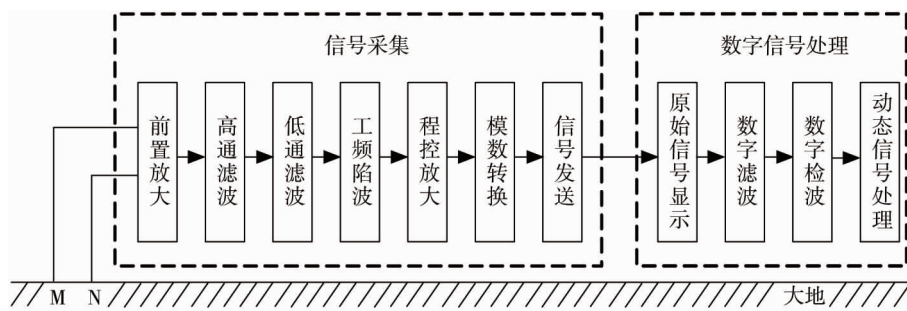


图 1 系统原理框图

其中,硬件部分由前置放大、滤波电路、工频陷波、程控放大、模数转换、数据发送等完成数据调理、采集并上传给上位机;上位机采用数字信号处理的方法,通过数字滤波,数字检波等方法,得到 1 Hz~2 kHz 内各频率分量振幅随时间变化的曲线,即获取的是各频率分量的连续时间波形信号,针对此类型信号可以进一步挖掘信息:通过计算其平均值则能够获取选频法静态信息,采用数值统计中均方差的计算方法还能将幅值的变动情况进行数学上的量化,通过上位机软件将各测点上各频点的动态信息统计,并自动绘制曲线,将选频法的动、静态信息相结合分析.

2.1 前置放大设计

如图2所示,每一通道前端采用仪用放大器AD620进行前置放大,隔离直流成分并完成阻抗变换^[17],其中 C_1 与 R_1 、 C_2 与 R_2 分别构成高通滤波器,其截止频率公式为 $f_0 = 1/2\pi RC$,通过阻容耦合的方式获取电极间微弱的天然电场信号^[18].考虑到本设计将截止频率设定为1 Hz,且为了满足接地条件恶劣的情况,输入阻抗设计为10 M Ω ,再通过截止频率公式计算得出电容值与电阻值.

前置放大增益计算公式如式5所示.

$$G = 1 + R_0/R_g. \quad (5)$$

式中: $R_0 = 49.4 \text{ k}\Omega$ 为满足实际应用中动态范围需求,设计前置放大2倍,即取 $R_g = 49.4 \text{ k}\Omega$,将主放大功能交给后级程控放大器.

2.2 工频陷波电路设计

实际应用中,特别是城市及周边人文电磁干扰严重,尤以工频干扰最为突出.为保证其他频率成分的信噪比,需要在前置放大后对不需要的频段的信号进行滤除,尤其是工频干扰^[19].本文设计的50 Hz工频陷波电路如图3所示.

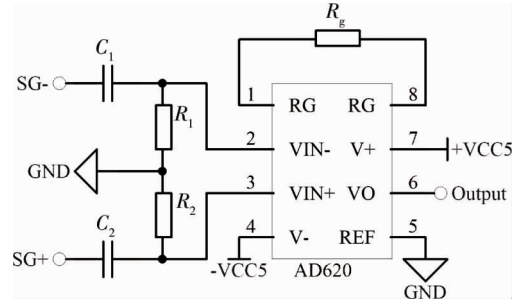


图2 前置放大电路原理

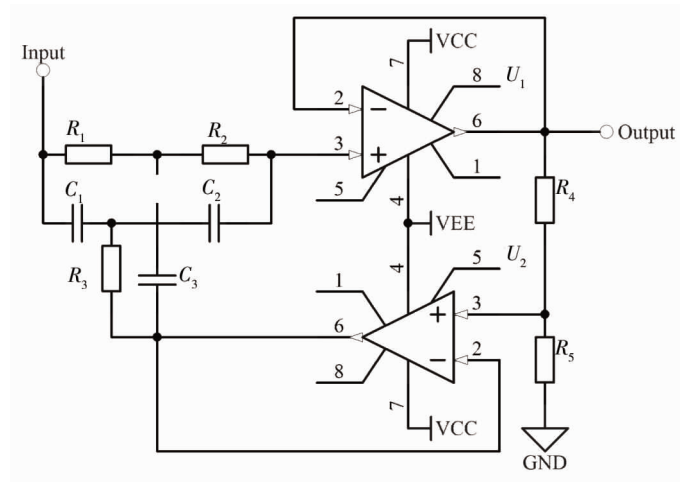


图3 双T陷波电路原理

为了简化计算使得 $R_1 = R_2$, $C_1 = C_2 = C_3$, $R_3 = 1/4R_1$, 该双T型陷波器计算公式经推导可得传递函数:

$$H(s) = -(s^2 + 8/R_3R_1C_1^2) / [s^2 + s(1 + 2R_3/R_1)(R_4/(R_5 + R_4)) / R_3C_1 + 8/R_3R_1C_1^2]. \quad (6)$$

带阻滤波器标准传递函数:

$$H(s) = G_0(s^2 + \omega_0^2) / [s^2 + \omega_0s/Q + \omega_0^2]. \quad (7)$$

两式对比可知增益:

$$K_p = G_0 = -1. \quad (8)$$

中心频率:

$$\omega_0 = 2\sqrt{2/R_3R_1}/C_1. \quad (9)$$

品质因素:

$$Q = (R_3C_1^2\sqrt{R_3R_1}) / [2\sqrt{2}R_4(1 + 2R_3/R_1) / (R_4 + R_5)]. \quad (10)$$

带宽:

$$B_w = [R_4(1 + 2R_3/R_1) / (R_4 + R_5)] / 2\pi R_3C_1. \quad (11)$$

令 $f_0 = 50 \text{ Hz}$, 则 $\omega_0 = 2\pi f_0$, 令 $Q = 8, 12.5, 18, 50$, 可计算出上述各元器件参数, 对此双T陷波器进行建模仿真, 其不同品质因素下的幅频曲线如图4所示.

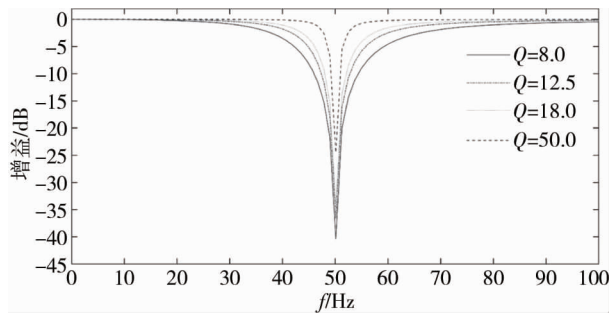


图 4 双 T 陷波器幅频特性

在 $Q = 8.0, 12.5$ 时陷波器陷波深度较大,其选择性亦较差,在滤除 50 Hz 工频噪声的同时对选频信号造成较多衰减;在 $Q = 50.0$ 时,陷波带宽窄,但陷波器陷波深度不足且电路稳定性较差.综合考虑选取 Q 值为 18.0,设计陷波深度为 -36.2 dB,带宽为 2.78 Hz, -3 dB 陷波带宽为 48.61~51.39 Hz.

2.3 模数转换电路设计

模数转换电路如图 5 所示,核心为 24 位高精度同时采样模数转换器(ADC) ADS131.可以配置为差分输入或单端输入,最大采样率为 128 kSPS.微处理器通过 4 线制 SPI 接口与 ADS131A04 进行通讯,控制 ADC 的信号输入方式、内部增益、内部滤波特性及采样率等^[20].采用单极性电源供电方式下电源输入范围为 3.3~5.5 V,在本设计中使用 5 V 电源,参考电压 V_{ref} 选取为 2.5 V,由 REF5025 提

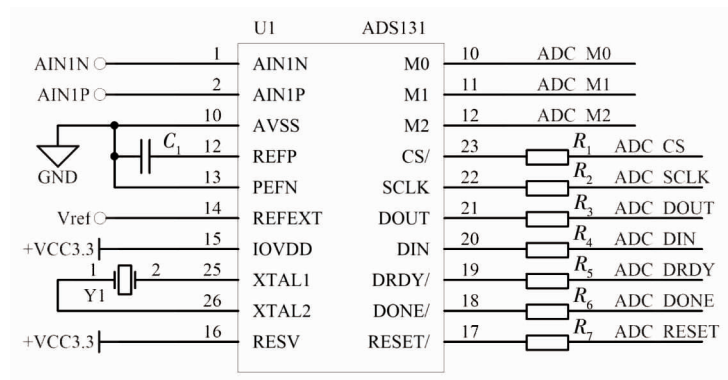


图 5 模数转换电路

供,其精度为 0.05%,为模数转换器提供稳定而高精度的基准电压,提高模数转换的精度,减小转换时位数的丢失.端口 M0, M1, M2 为 ADC 的配置端口,通过将其与数字高或低电平连接从而配置 SPI 模式、传输字长、汉明码错误校验使能.

2.4 上位机设计

上位机软件包括数据读取、频谱分析、数字滤波、数字检波、动态信号处理、绘制曲线、结果存储与查看等功能,软件界面如图 6 所示.



图 6 信号分析软件界面

具体上位机软件流程图如图 7 所示.

1) 首先需要将对下位机存储的文本格式文件进行读取,并将其转换为 Struct 数据,使用顺序循环将每个通道中所有数据循环读出并保存于全局变量中,方便之后的数据处理.

2) 得到数据并配置好相关参数后,对信号进行快速傅里叶变换,最高可以得到从 0 到采样频率一半的频谱,在天然场选频法中通常将系统采样率设置为 10 k 以上,要提高频谱的密度则需要提高观测的时间从而获得更多的数据量,而为提高测量效率亦可设定更短的测量时间,如 20 或 30 s 等.

3) 频谱图只能得到一段时间某个频点的大小,无法反映信号的动态特性.采取数字滤波的方式得到每个频点的数据,和模拟滤波器相比较,数字滤波器具有更好的滤波特性,参数选择更加灵活.本系统将所需频点频率作为数字滤波器中心频点,采用四阶巴特沃斯带通滤波器进行滤波,再进行数字包络检波得到信号的幅值.

4) 在得到单个频率随时间变化的曲线后对数据进行分析,提取采集时间内最大值、最小值、平均值,并对动态信息进行提取,即计算均方值.

5) 在完成一系列处理后,结果自动保存且绘制相应曲线.

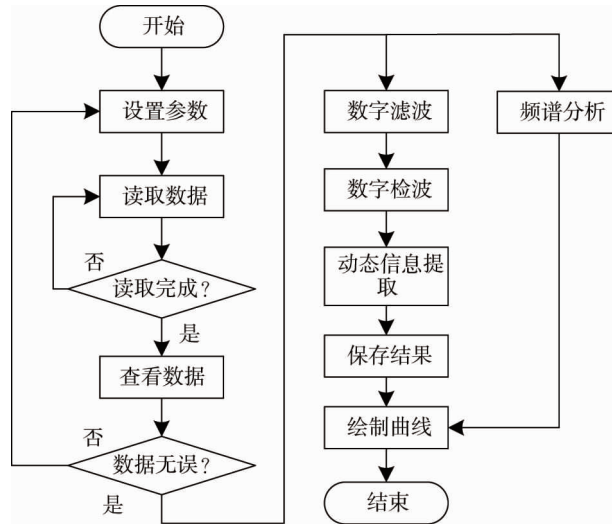


图7 上位机流程图

系统上位机软件中最重要的部分则是数字滤波和数字检波部分.在进行数字带通滤波器设计时根据给定指标,包括通带截止频率、阻带截止频率、滤波器阶数、信号采样率等,设计模拟巴特沃斯滤波器,根据标准式计算出原型滤波器传递函数,再由双线性变换法计算得到数字带通滤波器系统函数多项式中的系数 a_k, b_m , 最终得到式(12)所示线性差分方程组.

$$\sum_{k=0}^N a_k y(n-k) = \sum_{m=0}^M b_m z(n-m). \quad (12)$$

式中: $y(*)$ 为输入原始数字信号; $z(*)$ 为经过滤波后的数字信号.数字滤波的过程就是解上述线性差分方程组的过程.

数字检波具有很多不同方式,其中包络检波可以采用希伯特变换,微商等方式,本设计采用微商求极值后进行插值的方式进行数字检波.具体过程如图8所示.

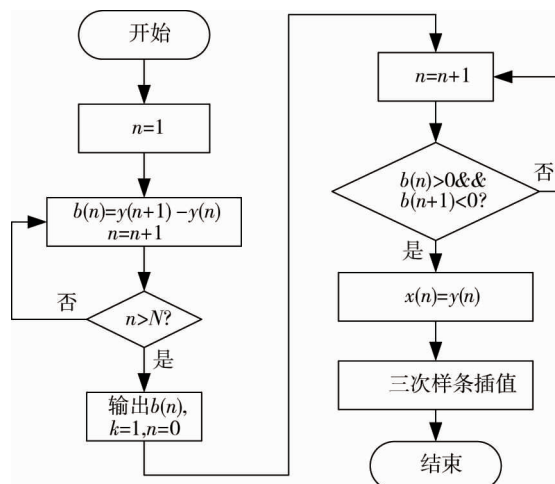


图8 数字检波流程图

图8中: $b(n)$ 为 $y(n)$ 相邻两项相减得到的新序列; N 为 $y(n)$ 序列总长度; $x(n)$ 为仅包含 $y(n)$ 极值的序列. 类似于连续可导函数求极值的方法: 在一个极大值点 x_0 处一定存在包含这个点的左区间 $(x_0 - \delta, x_0)$ 与右区间 $(x_0, x_0 + \delta)$, 且在左区间导数大于 0, 而在右开区间导数小于 0, 即在左区间是递增的, 而在右区间递减. 对于离散的序列来说, 对于任意一个极大值 $y(k)$ 且 $k > 1$, 一定存在 $y(k) - y(k-1) > 0$ 且 $y(k) - y(k+1) < 0$, 即对应图中 $b(n) > 0$ 且 $b(n+1) < 0$. 在得到整段序列的所有极大值后, 通过样条插值最终得到和原序列 $y(n)$ 等长的序列, 从而和采样周期相对应得到横坐标为时间, 纵坐标为幅值的动态曲线.

3 功能验证实验

为验证系统功能, 在室内与室外进行测试实验. 在室内采集 10 Hz 方波信号 (如图 9a 所示), 并对其进行频谱分析, 如图 9b 所示. 对于峰值为 1, 频率为 f_0 的方波 $R(t)$, 通过傅里叶变换可分解为奇次谐波的线性组合, 如式 (13) 所示.

$$R(t) = \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2k-1} \sin f_0(2k-1)t, k \in N_+. \quad (13)$$

图 9b 中 10, 30, 50, 70 Hz 频率分量对应幅值分别为 0.645 4, 0.214 7, 0.128 4, 0.091 2 V, 符合式 (13) 中各奇次谐波幅值的比例关系. 图 9c 为 10 Hz 带通滤波后波形, 图 9d 为滤波后对信号进行检波后的波形. 通过此方式得到 10 Hz 信号幅值约为 0.647 9 V, 与通过快速傅里叶变化得到结果相比较误差小于 0.4%, 可认为 2 种方式得到的结果一致, 且符合式 (13) 给出的理论结果.

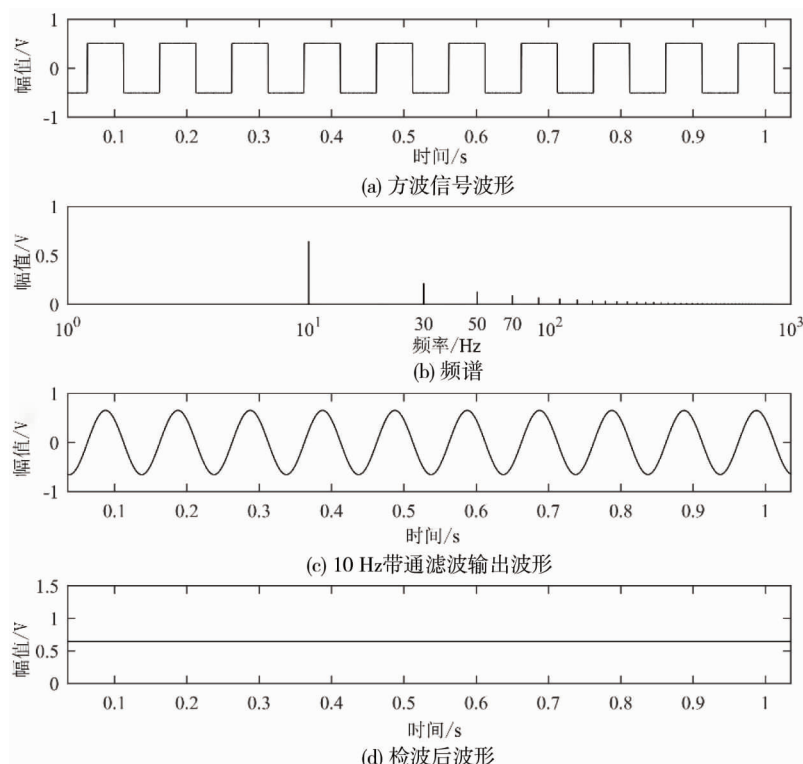


图9 人工源实验波形

在湖南科技大学地下水水源地附近进行实验, 现以 10 Hz 带通滤波为例, 图 10a 为采集到的原始信号波形图, 图 10b 为其频谱图. 从图 10 中可知: 此处采集到信号主要为 50 及 150 Hz 工频干扰, 由于学校内存在大量的用电设备, 即使在硬件设计中对工频噪声进行了一定压制, 但其幅值仍远大于天然场信号. 图 10c 为连续 60 s 原始信号经 10 Hz 数字带通选频滤波后波形, 选取其中一段. 图 10d 为滤波后检波的波形图, 即提取 10 Hz 正弦波信号每个周期的幅值, 在得到其幅值与时间的关系后便可以对其进行动态信号分析.

通过接收标准方波信号与天然场源信号, 并对数据进行分析, 证明该装置具备对微弱信号检测能力, 对数据处理可靠性高, 对人工源信号的接收符合其理论规律, 同时证明该装置的通用性较强.

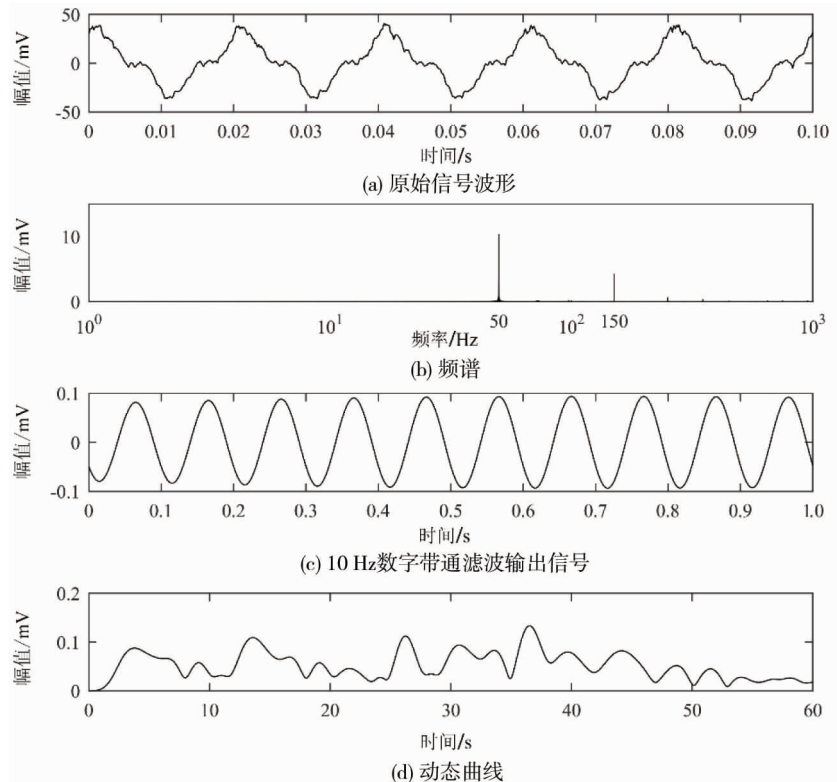


图10 天然场源实验波形

4 寻找基岩裂隙水实践

受湖南浏阳白泥村委托,寻找合适饮用水源地.实践场地选取为湖南浏阳大围山地质公园内,行政区划为大围山白泥村,该区域主要岩石种类为板岩,山中居民主要使用覆盖层潜水,经对预选地实地调查,发现各预选场地普遍存在:(1)基岩直接出露,覆盖层较浅,接地条件恶劣;(2)场地狭窄,中大型仪器无法正常工作.考虑到上述问题,结合本观测平台特征,输入阻抗高($>10\text{ M}\Omega$)、动态范围大($\pm 5\text{ V}$)、频带宽($1\text{ Hz}\sim 2\text{ kHz}$)、功耗低(约为 2.4 W)且设备轻便,认为使用本采集平台利用天然电场选频法动、静态信息进行剖面测量能较好地完成勘察工作.

本次实践选取接收极距 MN 为 10 m ,点距为 3 m ,共布置 17 个测点.同时为提高勘察的有效性与准确性,采用湖南继善高科技公司SQ-5型双频激电仪进行中梯观测,将双频激电法观测结果作为对照组,实验现场采取发送极距 AB 取 108 ,接收极距取 10 m ,点距 3 m 共布置 17 个测点.结果如图11所示.

图11为实验对比图,图11A选用观测仪器为双频激电仪,采用中梯装置观测.图11A可见:剖面电阻率最低值约 $400\ \Omega\cdot\text{m}$,最大值约 $1\ 200\ \Omega\cdot\text{m}$,探测目标为基岩裂隙水,本区内的出露岩体为泥质板岩,由已知物性资料可推测其剖面的中低阻带为破碎区,即可对图11A做如下推断:7~15号点的区域为低阻破碎带,该破碎带与地表观测到的地质异常吻合,4号点的低阻异常为单点异常,有待进一步验证.

对比实验结果见图11B.图11B中可见:7~15号点的区域内浅层区域存在成规模的低阻区域,推测为浅层破碎区域,其物质为破碎堆积物;同时,7号点位置上存在一条上下贯通的低阻体,该低阻体向8号点倾斜,推测为断层构造标注为F2;15~17号点电阻率由下至上急剧变大,变化梯度大,多点均有相同表现,推断该位置上存在一向小号位倾斜的断层构造,标注为F3.F2,F3这2条构造位置与倾斜方向与双频中梯装置异常吻合度高,具有较高的可信程度.同时,在3~4号位置上存在一处上下贯通的低阻体,由调查得知该位置上为村内集中供水前的大口饮水井.

图11C是天然电场中包含的动态信息图.为了进一步确定破碎带内异常点,提取观测到的天然电场时间波形数据中的动态信息辅助确定井位,提取后的图件采用均方差的数值统计法定量表示动态信息,即:均方差值越大则表示这一组数据离散程度越大,动态信号越强,对应信号变化的幅度越大,动态信号强度

与地下流体的赋存量正相关.由图 11A 和图 11B 可知:10 号点位置均为极小值的中心区域,为破碎的中心点,仅能证明是地下水赋存的较佳位置,但不能证明该区域就一定具有工业开采价值的地下水源.通过动态信息表明:10 号点的动态信息振幅值最大,即可从图 11B、图 11C 这 2 图中确定本次实践的最佳井位.

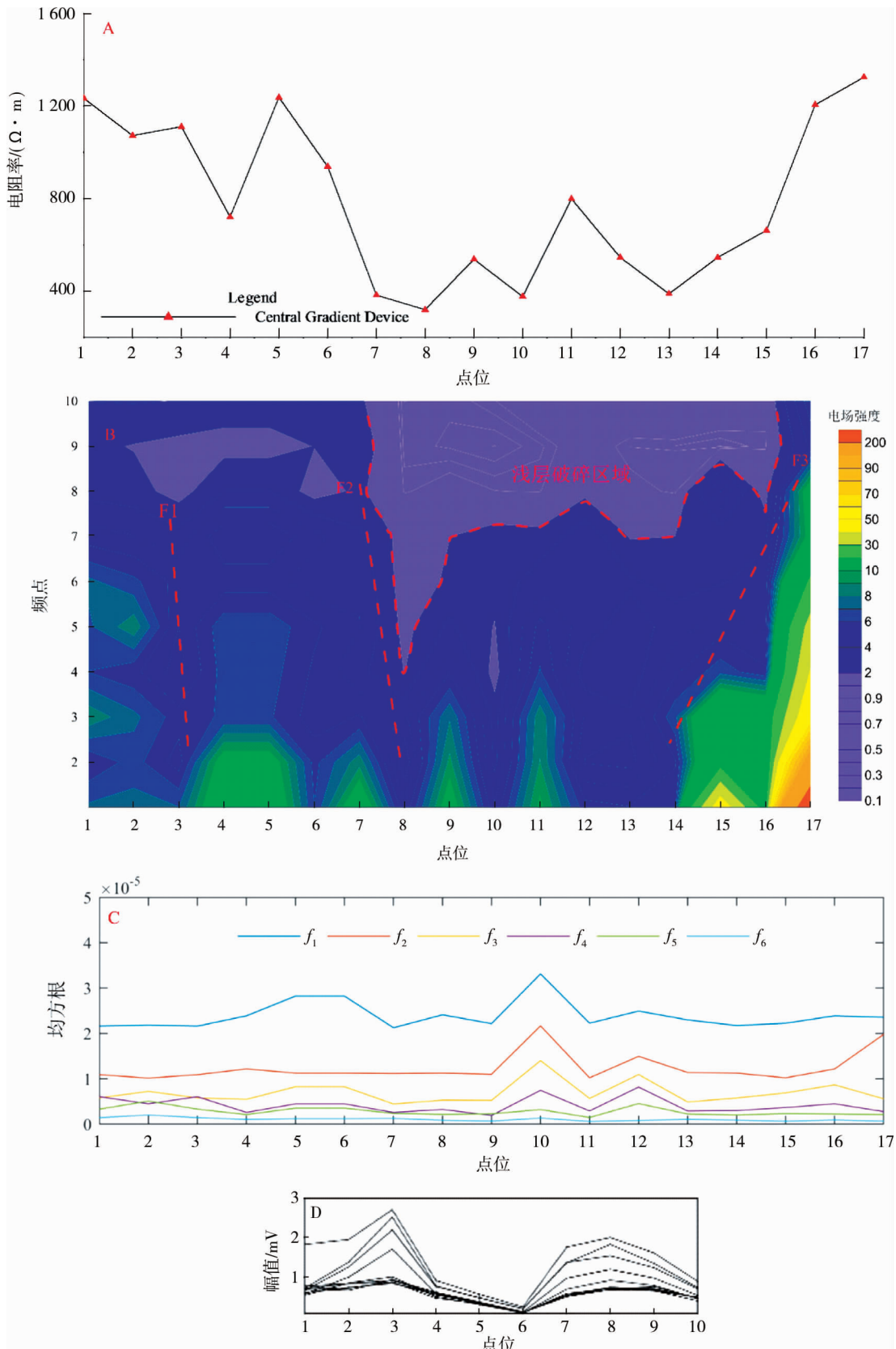


图 11 对比实验剖面

为进一步验证装置设计与软件开发的可靠性,采用湖南普奇地质勘探设备研究院 PQWT-S300 天然

电场找水仪对重点区域进行加密观测,对应图 11B 中 7~13 号点所在区域,实验采取天然电场剖面观测法,点距 2 m,极距 5 m,共观测 10 个点,该仪器最多可观测 40 个频点数据,本次实验取 10 个频点的电场振幅,观测结果如图 11D 所示。4~6 号点区域存在明显低阻异常,对应图 11B 破碎的中心区域,此观测结果进一步证明了本观测方案与装置可靠性与实用性。

相对于仅获取的静态信息的工作方式:采用较长点距观测初步确定破碎区域后,再进行加密观测从而确定井位,本文将动态信息与静态信息结合,一次观测便能获取观测地点的最佳井位,便捷性、可靠性俱佳。

5 结论

1)本采集平台可以精密采集频带在 1 Hz~2 kHz 范围内微弱信号,并对采集到的时频信号具有一定分析能力。

2)通过数字信号处理和数理统计方法对天然电场动态信息强弱进行数学分析,减小了通过人眼观察指针摆动来确定动态信息强弱所带来的误差。

3)综合利用天然电场静态信息和动态信息,在地下水资源勘探中具有独特优势,应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 张利平,夏军,胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 116-120.
- [2] 周斌. 国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项解析[J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 472-478.
- [3] 范宏喜. 我国地下水资源与环境现状综述[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 141-143.
- [4] 于开宁,廖安然. 基于生态位理论的河北平原地下水开采潜力评价[J]. 地学前缘, 2018, 25(1): 259-266.
- [5] JONES A G. Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment[J]. GEOPHYSICS, 1988, 53(7): 967-978.
- [6] 杨天春,梁竞,程辉,等. 天然电场选频法的浅层地下水勘探效果与异常分析[J]. 物探与化探, 2018, 42(6): 1194-1200.
- [7] 杨天春,王丹齐,张叶鹏,等. 生产矿山岩溶灾害勘察中的综合物探应用研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(3): 1145-1153.
- [8] 韩荣波,韩东.《天然电场选频法理论与实践》[M]. 北京:冶金工业出版社, 2020.
- [9] 杨天春,陈卓超,梁竞,等. 天然电场选频测深法在地下水勘探中的异常理论分析与实践应用[J]. 地学前缘, 2020, 27(4): 302-310.
- [10] 王齐仁. 天然交变电场动态特征研究[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(2): 52-55.
- [11] 周华,黄采伦,周益文. 地下磁流体探测方法及其应用[J]. 矿业工程研究, 2009, 24(2): 42-45.
- [12] 杨荣丰,张可能,徐卓荣,等. 利用天然电场选频法的动、静态信息确定地下径流通道[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(4): 25-27.
- [13] PHAM V N, BOYER D, YUAN X C, et al. Application of telluric-telluric profiling combined with magnetotelluric and self-potential methods to geothermal exploration in the Fujian Province, China[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1995, 65(3/4): 227-236.
- [14] YAAKOBI O, ZILMAN G, MILOH T. The electromagnetic field induced by a submerged body moving in stratified sea[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1994, 19:193-199.
- [15] 杨天春,夏代林,王齐仁,等.天然电场选频法理论研究与应用[M].湖南:中南大学出版社,2017.
- [16] 杨荣丰,张可能,徐卓荣,等. 天然电场选频法的动态信息在注浆堵水工程中的应用研究[J]. 工程勘察, 2003, 31(2): 66-69.
- [17] 程辉,白宜诚. 天然音频电场选频仪设计与应用[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2874-2879.
- [18] 程辉,付国红,刘晓琼. 岩矿石电性实验宽频序列信号发送机设计[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2014, 29(2): 22-26.
- [19] 程辉,傅崧原,李帝铨,等. 电磁勘探中工频噪声采集技术研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(6): 2667-2674.
- [20] 廖秀英,王婷,程辉,等. 中国 CO₂ 能源排放量与 CO₂ 大气浓度时空分布研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2014, 29(3): 103-107.