

PS100 型 IP 到端可控源高精度大地电测仪系统 ——CDMA 技术首次在地电阻率测量中的应用

赵璧如^{1,4}, 赵健^{1,4}, 张洪魁^{1,2}, 钱卫^{1,3}, 赵玉林¹, 钱复业¹

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 北京市地震局, 北京 100080;

3. 多伦多大学, 加拿大; 4. 北京云梦达通讯设备有限公司, 北京 100084)

摘要 CDMA 技术首次应用到地电阻率测量, 在强电磁干扰环境下实现微弱电信号的检测和高精度测量. 设计并实现了直接用标准电阻标定地电仪的方法并可对仪器的抗干扰能力进行测定. 仪器已在地震前兆监测、石油开发中得到实际使用, 实现在野外恶劣的测量环境下(信噪比 20 dB)取得 0.1% 的测量精度.

关键词 CDMA, 伪随机序列, 地电阻率, 抗干扰与高精度

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2006)02-0675-08

The PS100 high precision earth-eletricity instrument system (IP to IP) with controllable source ——Application of CDMA technology to the measurement of earth-resistivity for the first time

ZHAO Bi-ru^{1,4}, ZHAO Jian^{1,4}, ZHANG Hong-kui^{1,2},

QIAN Wei^{1,3}, ZHAO Yu-lin¹, Qian Fuye¹

(1. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China; 2. Beijing Bureau of Seismology, Beijing 102249, China;

3. University of Toronto, Canada; 4. Yunmengda of Beijing communication apparatus Co., Ltd. Beijing 100084, China)

Abstract CDMA technology is first applied to the measurement of earth resistivity. It realizes measuring of the faint electric signal and precision measurement under the strong interfering of electromagnetic environment. Have designed and realized with the measuring resistance to calibrate the earth resistivity instrument directly and can determine the anti-interference ability of the instrument. The instrument has already been used actually in monitoring of earthquake precursors, oil development, has achieved the measurement precision of 0.1% under the enviroment of abominable measurement of field (SNR 20 dB).

Keywords CDMA, PRBS, Earth resistivity, Anti-interference and high precision

0 引言

在地质勘探、地震监测中,常需要高精度地测量地电阻率在空间和时间上的变化差异,如采油注水引起的地电阻率和地震前兆的地电阻率变化都是很小的,仅为百分之几,因此需要测量精度优于 0.1%

的高精度测量仪器[Stephen K. Park, et. al, 1993]. 而大地存在各种各样的天然和人为的干扰,要求测量仪器具备很强的宽频带抗干扰能力,能在强电磁干扰环境下进行微弱电信号的检测和测量,并且要求达到相应的测量精度.

随着社会的发展,由于工农业电气化杂散电流

收稿日期 2005-07-10; 修回日期 2005-08-20.

作者简介 赵璧如, (1963-)男, 1984 年毕业于国防科技大学, 工学硕士, PS100 大地电测仪的设计与研制者, 主要研究方向: 仪器、通信、工业控制. (Email: zhaobiru@163.com)

中国地震局地球物理所论著号: 06AC1021

的严重干扰, Qian, W. v [L. B. Pedersen 1991] 指出 50 Hz 的工业干扰源所形成的人文干扰并不只限于 50 Hz 而是在 0.1~10 Hz 范围内, 其干扰强度都是以被动源的 MT 资料无法进行常规测量, 而现有主动源的地电阻率测量仪器也难于在强干扰环境中满足检测微弱的地电阻率讯号的要求, 致使电测量方法受到限制. PS100 高精度大地电测仪采用先进的 CDMA 技术, 从设计原理上最大限度提高仪器的抗电磁干扰能力, 在信噪比 20 dB 的高干扰情况下达到 0.1% 的观测精度, 满足了相关电探法和地震震兆观测中检测微弱的信息讯号并达到高精度测量的要求, 而且首次实现直接对地电阻率仪器在各种干扰存在的条件下进行抗干扰性能的定量标定.

1 目前测量技术的局限性

1.1 地电阻率的测量原理

理想情况下地电阻率测量原理示意图如图 1 所示:

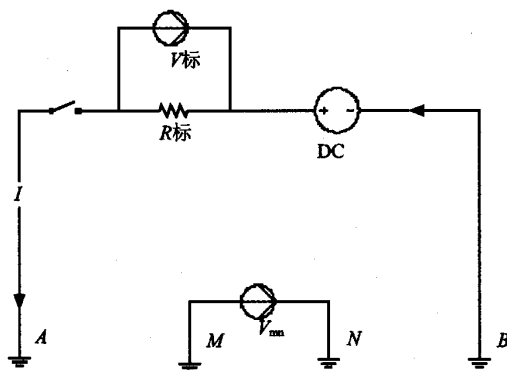


图 1 地电阻率测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the georesistivity measurement and the electrode array

使用一个理想的直流电源 DC 通过供电极 AB 向大地供入稳定电流 I , 电流 I 通过测定电流取样电阻 $R_{\text{标}}$ 上的电压 $V_{\text{标}}$ 来确定, 在测量极 MN 上可测得 I 在地下产生的人工电位差 V_{mn} , 地电阻率 ρ_s 的计算公式为:

$$\rho_s = K \cdot \frac{V_{mn}}{I} \quad (1)$$

式中 K 为具有长度量纲的装置系数, 其大小取决于 A、M、N、B 四个电极的相对位置. K 的计算公式为:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{BM}} \quad (2)$$

电流 I 可通过测量已知阻值的标准电阻 $R_{\text{标}}$ 上的电压 $V_{\text{标}}$ 来测定. 上述公式中 AM、AN、BN、BM 为相应电极间的距离, 单位为米 (m), V_{mn} 、 $V_{\text{标}}$ 的单位为伏特 (v), 电阻单位为欧姆 (Ω), 电流 I 的单位为安培 (A), 得到地电阻率的单位为欧姆·米 ($\Omega \cdot m$).

1.2 目前测量方法

目前传统的测量方法是通过测定跟地电阻率有关的几个量, 即测定 K 、 V_{mn} 、 $V_{\text{标}}$ 、 $R_{\text{标}}$ 的值, 再根据上面公式来推算出地电阻率. 基本流程是在测量过程中, V_{mn} 和 $V_{\text{标}}$ 经过 A/D 转换器变为数字量再和 K 、 $R_{\text{标}}$ 运算后得出地电阻率值. 地电阻率值的系统误差由 K 、 V_{mn} 、 $V_{\text{标}}$ 、 $R_{\text{标}}$ 四个量的测量准确度决定. 在理想无干扰环境下上述四个量很容易高精度测定, 而在野外实际测量过程中, 只有 K 、 $V_{\text{标}}$ 、 $R_{\text{标}}$ 三个量可通过传统手段控制在一定测量误差内, 而 V_{mn} 由于大地存在强干扰背景, 很难精确测定.

1.3 主要的干扰和消除手段

在跟地电阻率有关的 K 、 V_{mn} 、 $V_{\text{标}}$ 、 $R_{\text{标}}$ 四个值, 最好测定的是 K 值, 当 ABMN 四个电极确定后, 可通过精确的距离测量手段, 如使用激光测距仪测定 ABMN 之间的距离, 从而精确算出 K 值. 特别是在地震及采油开发的动态测量中, 电极 ABMN 的相对位置常是固定不动的, 这时 K 值为一固定常数.

$R_{\text{标}}$ 选用专业生产厂家生产的符合国家专业标准的高精度电阻, 等级为 0.01 级, 年变化误差小于 $\pm 0.01\%$, 再通过温度系数校正即可控制在很高精度以内.

V_{mn} 和 $V_{\text{标}}$ 的测量可选用高线性度、高分辨力的 A/D 器件, 同时使用高精度的基准电压参考源器件, 在不考虑干扰的情况, 以目前电子器件的生产水平, 也可以达到所要求的精度.

对于仪器的零漂和防止大地极化效应, 通常采用正反向供电, 对电阻 $R_{\text{标}}$ 上的电压 $V_{\text{标}}$ 和人工电位差 V_{mn} 采用逐步换向技术求其平均值便可消除.

V_{mn} 值的测量在大地存在强电 (磁) 干扰时, 由于实际存在的大量不可预测的干扰, 目前提高测量精度的措施主要有以下三种:

提高测量信号的信噪比 S/N, 即通过加大供电电流提高 V_{mn} 的值, 使 V_{mn} 比干扰背景高出很多.

由于地电阻率是大地的直流参数, 在对 V_{mn} 的测量中可通过低通滤波, 去除高频干扰的影响.

对于测量过程中的大量随机无规则干扰, 如大地电场 V_{sp} 改变, 工业杂散电流影响等, 只能采用多次测量求均值的办法.

1.4 存在问题

如前所述,大地的地电阻率的测量误差主要来源于测量人工电位差 V_m 时存在的大量无规则的随机人工干扰,设我们要测得人工电位差的真值为 V_m ,实际测量的人工电位差为 $V_{m'}$,则有:

$$V_{m'} = V_m + V_n, \quad (3)$$

式中 V_n 为干扰背景电位差,我们所说的干扰背景较小是指当时,也就是信噪比很大时的情况,而在实际环境中,特别是在城镇市区附近面临着强烈地工业和民用电信号干扰时, V_n 干扰幅值可能达到甚至超过 V_m ,如果在这一时刻测量,由于没有一种仪器能在某一时刻从 $V_{m'}$ 中区分出 V_n 因此会造成 V_m 的测量误差,从而影响到地电阻率的测量精度。

如果在测量中对 V_m 和 $I(V_{\text{标}})$ 的测量不是同时进行的,通过切换先后测量的 V_m 和 $I(V_{\text{标}})$ 之间存在时间差异 Δt ,也就是说在需要测定 t 时刻由电流 I 引起的人工电位差 V_m ,实际测定的是 t 时刻的 V_m 和 $t+\Delta t$ 时刻的 I . 在野外实际测量中,一方面很难做到稳定度很高的电源,更重要的是在 t 时刻的干扰电位差 $V_n(t)$ 与 $t+\Delta t$ 时刻时的干扰电位差 $V_n(t+\Delta t)$ 相差很大,因此也会造成地电阻率测量的误差。

2 CDMA 测量地电阻率原理

2.1 CDMA 与伪随机码

CDMA(Code Division Multiple Access)又称为码分多址,最先由美国高通公司开发出来的. CDMA 是为现代移动通信网所要求的大容量、高质量、综合业务、软切换、国际漫游等要求而设计的一种移动通信技术. CDMA 的基本原理是将需传送的信号用伪随机码 PRN(Pseudo Random Noise)编码调制后并发送出去. 接收端通过相关处理解码把发送的信号解调出来,恢复原始信号进行测量,并且把其他无关的信号(各种干扰)视为杂讯,完全不必考虑到信号碰撞的问题。

2.2 伪随机码特性

伪随机码(PRN)或伪随机序列. 通常采用反馈型移位寄存器产生伪随机序列,设有 n 级线性移位寄存器,经过适当的抽头反馈和模 2 加法器能产生序列的最大可能周期是 $p=2^n-1$,具有最大周期的序列叫最长线性反馈移位寄存器序列或 M 序列(方崇智等,1988). M 序列具有类似随机噪声的尖锐的自相关特性,但它又是周期性的有规律的,既容易产生,又可以加工和复制的序列。

对于码片宽度为 T_c ,码片波形为矩形,波形幅度出现 +1, -1 的概率各为 1/2,所有脉冲度取值相互独立且脉冲波形起始时间 T 在 $0-T_c$ 之间均匀分布,经推导可得周期为 p 的 m 序列的自相关函数为:

$$r(\tau) = \begin{cases} 1 - \frac{|\tau|}{T_c} \left(\frac{1}{p} \right), & |\tau| \leq T_c \\ -\frac{1}{p}, & T_c \leq |\tau| \leq pT_c/2 \end{cases} \quad (4)$$

M 序列的自相关函数如图 2 所示,由图中可以看出,当 $\tau=0$ 时, M 序列的自相关函数出现峰值 1; 当 τ 偏离 0 时,相关函数曲线很快下降;当 $1 \leq \tau \leq p-1$ 时,相关函数值为 $-1/p$;当 $\tau=p$ 时,又出现峰值 1;如此周而复始. 当 p 很大时, M 序列的自相关函数与白噪声类似. 相关检测就是利用这一特性来检测自相关函数值为 1 的码序列。

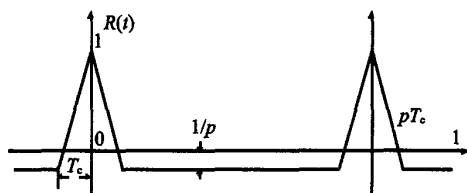


图 2 m 序列的自相关函数图

Fig. 2 Autocorrelation function of the M -sequence

功率谱和相关函数是一对傅立叶变换. 于是可得到 M 序列扩频码的功率谱为:

$$G(f) = \frac{p+1}{p^2} (\sin \pi f T_c / \pi T_c)^2 \times \sum_{k \neq 0} \delta(f - k/pT_c) + \frac{1}{p^2} \delta(f). \quad (5)$$

2.3 CDMA 测量地电阻率原理

CDMA 技术应用于测量地电阻率主要特点就是具有较强的抗干扰能力,通常工作在强干扰环境,这些干扰可分为外部干扰和测量干扰. 自然干扰主要有大地的激发极化效应,来自空间电磁耦合的干扰,地电场变化,在地磁场中(风吹)测量线摆动所产生的变化电场干扰,工业和民用电设备干扰等,测量干扰主要指仪器内部和测量过程中引入的噪声,如仪器内部的元器件内部噪声,采样量化噪声等. 可以用高斯白噪声作为其模型,其功率谱密度覆盖系统所有频带。

对于地电阻率测量,如前所叙,如果能提高对 V_m 人工电位差的测量精度,并同时测量 V_m 和 $I(V_{\text{标}})$ 的值就可以保证地电阻率的测量精度. CDMA

测量原理正是通过可控源对供入地下的电流 I 进行编码调制,在测量端(接收端)同时对 V_{mn} 和 $V_{\text{标}}(I)$ 进行相关检测并解码测量,由于输入电流 I 和输出 V_{mn} 和 $V_{\text{标}}(I)$ 具有相关性,而其它干扰与电流 I 不相关,因此最终测量到的 V_{mn} 和 $V_{\text{标}}(I)$ 就是由于输入电流 I 引起的. CDMA 测量之所以能提高测量的精确性,其原理就是通过可控源对供电电流 I 编码和相关计算,在一段时间内,精确地把 V_{mn} 和 $V_{\text{标}}$ 区分出来,在输出端有效抑制干扰功率,提高了测量时的信噪比,其噪声的抑制能力的定量计算原理推导过程如下:

构建如图 2 所示的测量模型,图中输入 $v(t)$ 为供入地下的经过伪随机码调制的电流信号,输出 $u(t)$ 为观测到的电信号,也就是测量到的信号,外部干扰和测量噪声干扰可以统一看作一个干扰信号 $n(t)$,其中输入 $v(t)$ 、输出 $u(t)$ 是可观测到已知的,干扰 $n(t)$ 为未知,不可预测的.

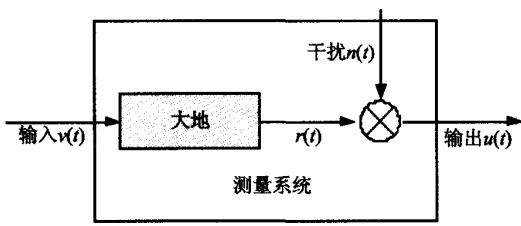


图 3 测量模型
Fig. 3 “Black box” model

如图 2 所示,其中测量到的系统输入输出信号 $u(t)$ 、 $v(t)$ 有如下关系:

$$u(t) = h(t) \times (v(t) - n(t)), \tag{6}$$

式中 $h(t)$ 为测量系统的时域特性传输函数,设干扰 $n(t)$ 是独立的、0 均值带限 f_d 平稳随机过程,功率谱密度为 $S_n(f)$,噪声功率为 P_n (查光明等,1999):

$$E(|n(t)|^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_n(f) df = p_n. \tag{7}$$

由于输入 $v(t)$ 和噪声 $n(t)$ 相互独立,通过将输出 $v(t)$ 与输入 $u(t)$ 做相关处理后则噪声输出成分的方差,即噪声输出成分的平均功率变为:

$$\sigma^2 = \iint_{-\infty}^{+\infty} h(\alpha) h(\beta - \alpha) N(\alpha - \beta) M(\alpha - \beta) d\alpha d\beta, \tag{8}$$

式中

$$N(\alpha - \beta) = E(n(\alpha)n(\beta))$$

是噪声的自相关函数,等于它的功率谱密度 $S_n(f)$ 的付氏变换. 而

$$M(\alpha - \beta) = E(v(t - \alpha)v(t - \beta))$$

是输入信号的自相关函数,为输入信号功率谱密度 $S_v(f)$ 付氏变换. 因此(公式 8)的付氏变换形式为:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |H(f)|^2 (S_v(f)) df, \tag{9}$$

式中 $H(f)$ 是为测量系统的频率特性传输函数,是测量系统的时域特性传输函数 $h(t)$ 的付氏变换. 因此 $|H(f)|$ 可设计为低通滤波器在通带 0 Hz 附近(直流)内为 1,其他频带范围均为 0. 这样(公式 9)可简化为:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (S_v(f) S_n(f)) df, \tag{10}$$

$S_v(f)$ 是输入信号的功率谱密度,由于输入信号为调制的伪随机信号,因此 $S_v(f)$ 已知,见(公式 5). 当输入信号周期 N 远大于 1 时,可表示如下:

$$S_v(f) = \frac{1}{N} \sum_{j \neq 0} \delta(f - j f_d) \left(\frac{\sin(\pi f / N f_d)}{\pi f / N f_d} \right)^2,$$

在通带 0 Hz 附近(直流)附近有:

$$\left(\frac{\sin(\pi f / N f_d)}{\pi f / N f_d} \right)^2 \approx 1$$

则有:

$$S_v(f) \leq \frac{1}{N} \left(\delta\left(f - \frac{1}{T}\right) + \delta\left(f + \frac{1}{T}\right) + \delta\left(f - \frac{2}{T}\right) + \delta\left(f + \frac{2}{T}\right) \dots \right). \tag{11}$$

噪声功率谱密度 $S_n(f)$ 是带限噪声 $n(t)$ 的功率谱密度,其功率谱分量在 $(-f_d, f_d)$ 以内,那么:

$$S_v(f) \leq \frac{1}{N} \left(\delta\left(f - \frac{1}{T}\right) + \delta\left(f + \frac{1}{T}\right) + \delta\left(f - \frac{2}{T}\right) + \delta\left(f + \frac{2}{T}\right) \dots \right).$$

按(公式 6)给出的噪声平均功率为 P_n ,有:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{1}{N} \int_{-f_d}^0 S_n(f - f_d) df \\ &\quad + \frac{1}{N} \int_0^{f_d} S_n(f + f_d) df \\ &\leq \frac{1}{N} \left(\frac{P_n}{2} + \frac{P_n}{2} \right) \\ &\leq \frac{P_n}{N}. \end{aligned} \tag{12}$$

由此可知,通过相关计算可把输入噪声 $n(t)$ 的功率降为原输入噪声功率的 $1/N$. 因为在测量过程中,除零均值高斯白噪声之外,还存在窄带随机过程的干扰,这两种干扰与输入可控源功率信号均是完全独立的,对于 0 均值的高斯白噪声,在整个频带上

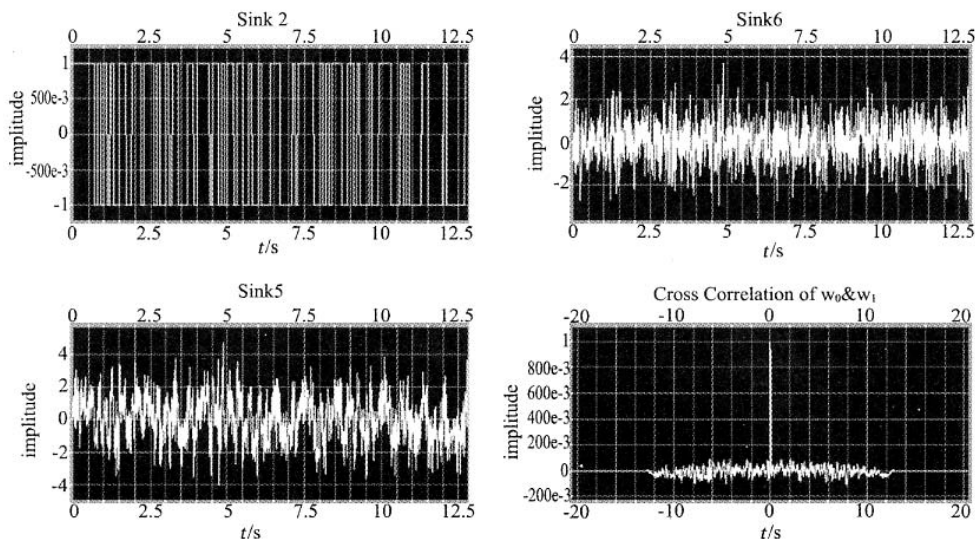


图 4 CDMA 测量抗干扰模拟图

Fig. 4 Emulation result of the noise immunity of the CDMA technique

有 $N_0/2$ 的双边功率谱密度,因此在这两种噪声干扰存在的情况下,此时测量系统输出信噪比是:

$$\begin{aligned} \text{输出信噪比} &= \left(\frac{\text{有用信号功率}}{\text{噪声功率} + \text{干扰功率}} \right)_{\text{out}} \\ &= \frac{P}{N_0/2T + P_n/N}, \end{aligned}$$

式中 P 是可控源供入地下的调制信号输入功率,干扰信号功率为 P_n/N (N 为输入伪随机调制信号周期), P_n 是窄带随机干扰输入信号功率, T 为可控源伪随机调制信号的脉宽.可见 N 和 T 越大,测量过程的输出信噪比也越大,从而实现对 V_m 的高精度测定.实际使用中如果测量的输入输出的信号相对于高斯白噪声足够大,暂不考虑高斯白噪声的影响,当 N 取 $127(2^7 - 1)$ 时可获得 21dB 的信噪比增益,当 N 取 $255(2^8 - 1)$ 时可获得 24 dB 的信噪比增益.

2.4 CDMA 测量抗干扰能力的计算机模拟

我们利用 SysytemView 对 CDMA 测量抗干扰特性进行模拟,为了更清晰的表现出 CDMA 测量的原理,故对要点的波形进行了比较.如图 4 所示:

图中左上方为一个 127 位的伪随机序列信号,相当于 $v(t)$,右上方为高斯噪声信号 $n(t)$.左下方为伪随机序列信号 $v(t)$ 上叠加了高斯噪声 $n(t)$ 的输出信号 $u(t)$,此时的信噪比为 0 dB,右下方为其相关曲线,可见通过相关计算已经把噪声抑制到很低,此时增加的信噪比大约为 21 dB,因此可减小测量误差,进一步提高观测系统的测量精度.

3 仪器设计与实现

PS100 硬件系统的采用模块化设计,便于仪器的维护和扩充,主要由主控计算机单元,基准测量单元,测量单元,控制编码单元,大功率供电电源单元构成. PS100 的系统结构框图如下:

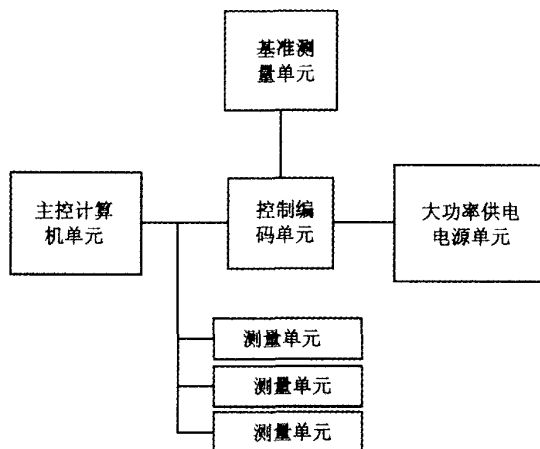


图 5 PS100 系统结构框图

Fig. 5 Block diagram of the PS-100 instrument

主控计算机单元带有显示器、键盘、鼠标、扬声器等,提供友好的人机界面,同时带有网络通信接口实现数据远程传输和仪器控制.

控制编码单元接收主控计算机单元指令,产生

伪随机码,并对仪器的其他部分进行控制。

大功率供电电源单元为高电压、大电流的可控稳压电源,用来提供大的供电电流。

基准测量单元提供仪器测量中需要的高精密基准电压和高精密基准电阻。

测量单元实现对外部信号的测量,是实现 CD-MA 高精度测量的核心,由滤波电路、放大电路、A/D 转换电路、DSP 处理器、存储器、通信电路组成。测量控制单元可根据需要任意增加,实现多路同时测量。

软件是仪器的灵魂,在仪器的软件开发中充分考虑仪器应用的需要,将数据采集记录与处理分析结合起来,利用仪器的硬件特点,实现高度自动化、通用化。同时软件还要有高度的可维护性。PS100 高精度大地电测仪采用面向对象的软件开发技术,采用了对象模块化的程序结构,使用窗口式用户界面,便于用户操作和使用。

4 仪器抗干扰效果实例

4.1 实验室抗干扰测试

在试验室环境中,可用信号发生器作为干扰信号源提供干扰信号,信号发生器的输出信号波形、频率、幅值均为可调,因此可模拟多种干扰情形。由于 PS100 测量过程中需对待测标准电阻 R 供电,处于安全考虑,可用四个 1K 的高精密电阻构成一个衰减网络,实现与信号源的隔离,具体测试电路如图 6 所示。

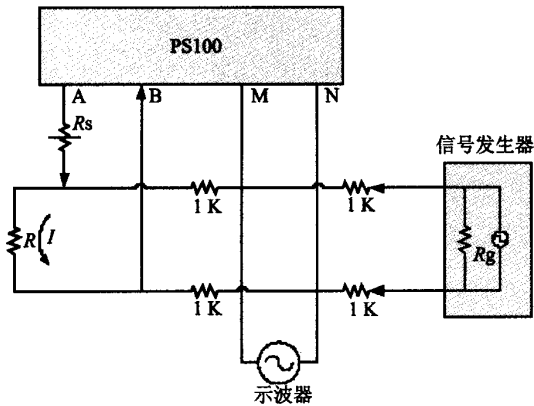


图 6 PS100 实验室抗干扰能力测试电路图

Fig. 6 Scheme of the laboratory test of the noise immunity of the PS-100 instrument

R 为待测电阻选用 0.01 级的标准电阻,阻值为

$0.1\ \Omega$ 。 R_s 为限流电阻,调节 R_s 可改变电流 I 的大小。在不考虑信号发生器内阻的情况下,四个 1 K 的高精密电阻构成一个衰减网络,其衰减比为 1/2,即在 MN 测得的信号幅值只有加在 R 上信号幅值的 1/2,在实际测量中由于信号发生器的内阻 R_g 不是足够小,需要考虑 R_g 的影响。示波器用来观测 PS100 仪器输入端的信号和干扰情况。

下面为在中国计量科学院做仪器鉴定时,使用图 6 测试电路实测的一组数据,见表 1。实验中使用的干扰源为正弦波,加在 MN 上,仪器输入端的信噪比为 20 dB,PS100 使用的测量量程为 350 mV,考虑了信号发生器的内阻,实际分压比为 1.7979×10^{-4} ;对于每种干扰情况测量五次。PS100 当时使用的是 6 位伪随机序列。从实验数据可以看出,在信噪比为 20 dB 的情况下,仪器的实测值与电阻的实际值(真值)的偏差和均方差均小于 0.1%,说明仪器已具有很强的抗干扰能力,达到设计要求。

注:表 1 中的偏差按下面计算公式求得:

偏差 = (平均值 \times 分压比 - 实际值) / 实际值

表 1 中国计量科学院实验室对 PS-100 仪器抗干扰能力的测试结果

Table 1 The result of the calibration measurement of the PS-100 instrument noise immunity performed by National Institute of Metrology(NIM)

| 干扰频率 (Hz) | 实际值 (Ω) | 显示值 (Ω) | 平均值 (Ω) | 偏差 (%) | 均方差 (%) |
|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------|------------|
| 1 | 0.1000 | 556.6754 | 556.5355 | 0.05 | 0.05 |
| | | 556.1698 | | | |
| | | 556.4180 | | | |
| | | 556.5494 | | | |
| | | 556.8649 | | | |
| 10 | 0.1000 | 555.9663 | 555.8686 | -0.06 | 0.01 |
| | | 555.8708 | | | |
| | | 555.8537 | | | |
| | | 555.8261 | | | |
| | | 555.8261 | | | |

4.2 野外实测数据

2004 年 4 月在四川红格地震台做了一次仪器的野外抗干扰能力实验。由于在野外条件限制,不能同在同一时间内分别采集干扰信号和人工信号,我们只能假定干扰信号在短时间内特性不会有大的改变,同时大地的电阻率在短时间内也是不变的常量。在 PS100 测量后不供电的情况下,即没有人工信号时,利用 PS100 自身的采样电路测得的干扰信号图,采样频率为 2Hz,测量时间为 400 秒的波形图如

图 7 所示。

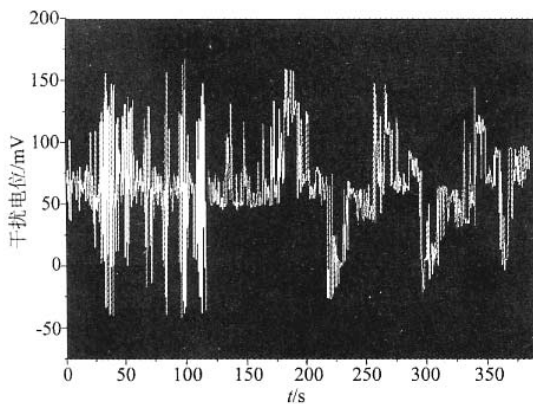


图 7 PS100 测得的野外干扰波形图

Fig. 7 Noise level recorded at the station

可以看出自然电位是 62.8 mV(平均值),不规则干扰 P-P 值不低于 150 mV,仪器 PS100 时使用的是 7 位伪随机序列在 9:20 到 9:40 之间测得的五次地电阻率数据如表 2 所示。

表 2 PS100 野外抗干扰能力测试数据

Table. 2 The result of field measurement of the PS-100 instrument noise immunity

| 测量 序号 | 地电阻率 ($\Omega \cdot m$) | 平均值 ($\Omega \cdot m$) | 偏差 (%) | 均方差 (%) |
|----------|------------------------------|-----------------------------|-----------|------------|
| 1 | 55.349 | | | |
| 2 | 54.926 | | | |
| 3 | 55.177 | 55.183 | 0.1582 | 0.30 |
| 4 | 55.260 | | | |

根据 K 值和地电阻率值可推出人工电位大约在 16.5 mV,表明 PS100 在野外信噪比约为 0 dB 的情况下,观测精度达到 0.30%。

4.3 PS100 与某地电阻率仪野外长时间小时测值实测数据对比结果

图 8 上部曲线为 PS100 的测量值,下部的是原仪的曲线。两种仪器基于同一测量线路和测量电极连续 7 天的小时观测值对比结果可看出,PS100 更有效地抑制了干扰,并且能长时间稳定工作。

4.4 测到的地震短临前兆中的地电阻率潮谱

图 9 中为某地震台连续 16 天地电阻率的小时观测值,可以清楚地看出 0.5% 左右的地电阻率潮谱变化情况。8 月 10 日距台站的 200 km 处发生了鲁甸 5.6 级地震。

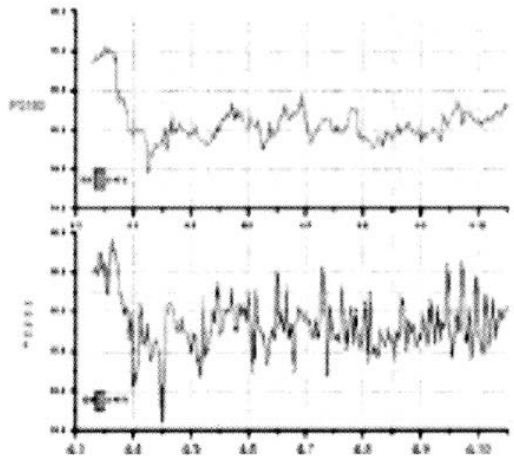


图 8 某电阻率地电台原线路原
电极两种不同仪器对比记录

Fig. 8 Georesistivity curve of hourly value recorded at the same station by PS-100 instrument (top) and by the other type instrument (bottom)

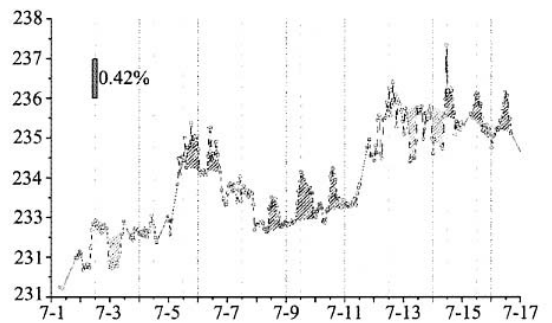


图 9 鲁甸 5.6 级地震前冕宁台 PS100 仪器
地电阻率小时值曲线

Fig. 9 Georesistivity curve of hourly value recorded by PS-100 instrument prior to the M5.6 Ludian earthquake

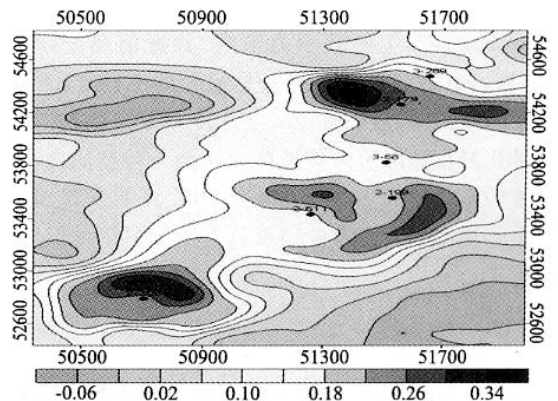


图 10 PS100 仪器在某采油区测量
的视电阻率平面图

Fig. 10 The apparent resistivity plan of a certain oil recovery area measured by the PS-100 instrument

4.5 在石油开发中的测量实例

图 10 给出 PS100 精确测量绘制的某采油厂全区视电阻率背景场图,可通过三维电阻率反演成像技术推测油田地下油气分布。

5 应用领域

PS100 型高精度大地电测仪克服了传统电阻率测量仪器抗干扰能力差的缺点,可取代传统电法测量仪器,PS100 具有手动、自动观测记录多通道同时采样测量数据,具有 IP 到端的远程数据传输和监控功能,可实现流动与固定的大面积测量。适用于地面和坑道电阻率法测量(地震预报中的地电阻率法),进行垂直电测探法、电剖面法等电法勘探。广泛应用于石油勘探开发、地震监测、水文、环保、工程物探、金属与非金属矿产资源勘探等各个方面。

目前在油田方面 PS100 已应用于井间三维动态影像监测,该仪器和技术不仅能解决注水井注水推进方位,而且还能解决注入水的波及前沿和波及速度等问题,为确定井间剩余油分布提供准确的资料数据,是提高油田产能建设的重要依据。

地震监测方面已在预报地震的地电方法中应用(川滇地区强化地电观测项目),观测取得了连续可靠记录,在信噪比 0~20 dB 情况下达到了 0.05%~2% 的观测精度,并且检取到云南鲁甸 5.6 级地震的微弱短临震兆异常(0.5%~2%)[Zhang H-K, et al., 2006],反映该仪器具有很强的抗干扰能力和高的灵敏度和稳定性。

在 2004 年 12 月 26 日印尼 9 级海啸大地震前 3 天,在远离震中近 3000 km 的中国川滇地区的 PS100 仪器台网,观测发现了来自大地震(震源体)断层预破裂产生的潮汐力谐振、共振前兆波(简称 RT 波),它是至今世界尚未见报导的不同于传统地震波的,波速很慢(346 km/h, 126 km/h)的,主要通过多孔岩石孔隙流体传播到台站的一种新的地震前驱波(Zhao Y-L, et al., 2006)。RT 波地发现,将会对短临地震预测方法的突破具有重要科学价值和预报意义。

6 结 论

PS100 型 IP 到端远程监控可控源大地电测仪,将现代通讯领域中的 CDMA 高新技术,首次应用到地球物理电探仪器中,从理论到实际有效地消除了

来自外界环境极其严重的电(磁)干扰(天然的及工农业生产的游散电流干扰),从而将地电测量的实际观测精度提高了 1~3 个数量级(在 20~0 dB 强干扰背景下,小时值及 5 min 值的实际观测精度达 0.05%~0.1%)。这一结果保证在同样信噪比的条件下,不仅可以简化目前国内外在用的庞大笨重的发射机设备,提高了各种电探法外业的工作效率,更重要的是可以将电探方法扩展到原来的电探法的禁区工作,如大城市,大发电站,大工矿地区等。2004~2006 年,由于 PS100 仪器在地震预测方法中的采用,在世界上第一次观测发现了来自震源区断层预破裂所引起的微弱的(0.05%~2%)RT 波短临前兆,为电测地震预测方法的应用前景提供了极为可贵的基础实例。

此外,PS100 大地电测仪还具有 IP 到端、远程自动检测、实时处理、传输与远程监控、多通道同步检测与同步进行面积测量的功能。操作和分析人员可以远离测点和测区,实行无人监控测量等,有利于在无人区的长期定点测量和非安全区(如滑坡、管涌堤坝、岩爆矿区等)的电探测量。PS-100 大地电测仪将会在地下水源、地热、矿产资源、构造探查、城市与矿区的工程物探、环境物探预测,特别是 1~3 d 的大地震临震预测等方面,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献 (References):

- [1] 方崇智,萧得云. 过程辨识[M]. 北京:清华大学出版社,1988.
- [2] 查光明,熊贤祚. 扩频通信[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1999.
- [3] Park S K, Johnston M J S, mADDEN t r, Morgan F D, Morrison H F. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: a review of observations and mechanisms, *Reviews of Geophysics*, 1993, 31, 2, 117~132.
- [4] Qian W, Pedersen B. Industrial interference magnetotellurics: an example from the Tangshan area, *China Geophysics*, 1991, 56, 2, 265~273.
- [5] Zhang H K, Zhao B R, Huang Q H, Zhao J, Qian W, Qian F Y. PS-100 anti-interference electrical observation system and its application to earthquake prediction study, *Physics and Chemistry of the Earth* (in press), 2006.
- [6] Zhao Y L, Zhao B R, Qian W, Zhao J, Zhang H K, Huang Q H, Lu J, Zhang P, Qian F Y. PS-100 anti-interference precision earth-electricity observation system and geoelectric resonance waves driven by tidal forces prior to large shallow earthquakes, Accepted by, WPGM (Western Pacific Geophysics Meeting, 24-27 July 2006 in Beijing, China), 2006.