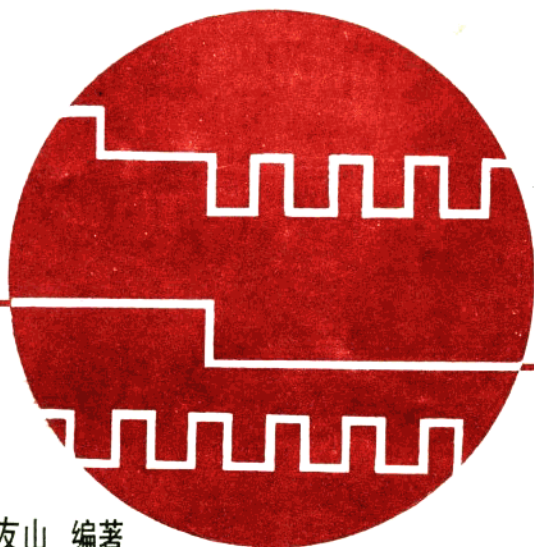
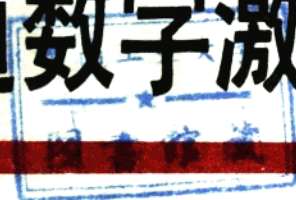


678403



何继善 鲍光淑 张友山 编著

双频道数字激电仪



中南工业大学出版社

前 言

观测仪器对于地球物理工作是极其重要的，因为任何一种地球物理方法都必须首先采集数据。我国幅员广大，只能主要依靠自己研制和生产的仪器来进行地球物理工作。引进国外先进技术是十分必要的，适当地引进一些仪器也是可以的，但是最终的立足点必须依靠我们自己。因为技术的输出受到各国保密条例的限制，输出的技术，一般都是在这个国家属于第二流的、甚至是即将淘汰的；国外的仪器在技术上即使先进，可是并不一定都适合我国国情。在一定时间内，对国外先进仪器加以仿制和改进是有益的。然而，如果仅仅停留在这个阶段，那末我们的仪器就只能总是落在别人后面。要使我国在这一领域尽快赶上甚至超过世界先进水平，就必须依照我国国情来研制地球物理仪器。“双频道数字激电仪”便是在这方面的一次尝试。

我国开展激发极化法已有30年了。早期进行的都是时间域激发极化法（或称为直流激发极化法），而频率域激发极化法（或称交流激发极化法）在我国只有20年的历史。我国金属矿多产在山区，地形复杂，交通不便，接地条件也常常不好；在这种条件下，频率域激发极化法特别是双频道激发极化法显示了强大的生命力。这主要是因为它所需要的供电电流小（在同样条件下，只需要时间域激发极化法的二十分之一左右），因而整个装备轻便，施工人员可以减少一半以上，并且观测速度和精度较高。双频道激发极化法还有一个重要优点，就是抗干扰能力很强，这对于在矿区周围开展普查找矿工作十分有利。

我国电子器件工业还较落后，在研制地球物理仪器时，最关键的是仪器的整体构思必须是先进的。双频道数字激电仪的核心是“双频道”，不但发送机同时发送双频电流，而且接收机同时测量双频电位差。正如专家们在鉴定中所写：“它具有观测精度高、读数快、无需换频联系和抑制50Hz工业干扰能力强等优点”，“对元件挑选不苛刻”，“是我国首创的一种新型的频率域激电仪”。

正因为双频道数字激电仪是我国首创的仪器，没有现成的样机可以借鉴，因而它的雏型必然是不完善的，从它的诞生到现在已经花了整整十年，十年来得到了我国广大物探工作者的支持与爱护，要特别感谢在野外使用双频道数字激电仪的同志们，是他们的智慧和汗水浇灌了这枝确实属于我国自己培育出来的花朵，是他们在各种地电条件和气候条件下积累了丰富的经验，提出了许多改进意见，使它不断得到改进并逐渐趋于完善。我们深信，在我国物探工作者的共同努力下，我们一定能够研制出更多的具有我国特色的物探仪器，为发现更多的矿产而作出我们应有的贡献。

何继善

1987年4月

目 录

第一章 双频道幅频观测.....	(1)
第一节 双频道幅频观测的特点.....	(1)
第二节 双频道数字激电仪的设计思想.....	(5)
第三节 双频道数字激电仪的技术指标.....	(7)
第四节 S-2型仪器与S-1型仪器的差别.....	(10)
第二章 S-2发送机电路原理.....	(11)
第一节 供电主回路.....	(12)
第二节 双频信号源电路.....	(17)
第三节 控制与触发电路.....	(19)
第四节 测量电路.....	(22)
第五节 其它电路.....	(24)
第三章 S-2发送机的使用与维护.....	(27)
第一节 S-2发送机的使用方法.....	(27)
第二节 S-2发送机的维修.....	(33)
第四章 S-2接收机的电路原理.....	(34)
第一节 共同通道.....	(35)
第二节 高频通道与低频通道.....	(41)
第三节 模数转换与 F_s 计算.....	(53)
第四节 程序控制电路.....	(60)
第五节 数字计算与显示电路.....	(65)
第六节 稳压电源.....	(78)
第五章 S-2接收机的使用方法与维护.....	(79)
第一节 S-2接收机的使用方法.....	(79)

第二节 S-2接收机的维修·····	(81)
第六章 数字式双频道幅频仪的应用实例 ·····	(85)
第一节 在金属矿床上的应用·····	(85)
第二节 在水文、工程地质上的应用·····	(88)

附 录

- 一、可控硅
- 二、CMOS电路
- 三、S-2双频道数字激电仪发送机电原理图
- 四、S-2双频道数字激电仪接收机电原理图

第一章 双频道幅频观测

第一节 双频道幅频观测的特点

激发极化法是一种地球物理勘探方法。它广泛地应用于金属矿、水文地质、油气田和煤田勘探中。由于它在地质普查勘探中有良好的地质效果，在国内外受到普遍重视，得到广泛应用。激发极化法分为时间域激电法和频率域激电法。这两种激电法原理是一致的，只是方法、技术不同。频率域激电法比时间域激电法轻便，适合于大面积普查找矿工作。

频率域激发极化法既可以利用极化体的幅频特性也可以利用其相频特性。在普查找矿中，一般不需要进行频谱测量，只需在若干频点进行测量以发现极化体。为此，可以测量振幅、相位、虚分量或实分量。我们认为用振幅测量，具有如下优点：

(1) 在相同供电电流的条件下，振幅信号比相位信号强数倍乃至数十倍；

(2) 振幅测量无需定时，即无需相位参考信号；

(3) 存在激电异常时，振幅特性是单调的递减函数，因而只要选择两个频点，就可以发现异常。

幅频观测的基本参数是视幅频率 F_s 。在这里，我们对它加以定义：

$$F_s = \frac{\rho_{SD} - \rho_{SG}}{\rho_{SD}} \times 100\%$$

式中 ρ_{SD} 和 ρ_{SG} 分别是在不改变电极位置的情况下，用低频供电和高频供电所测得的视电阻率，因而

$$F_s = \frac{K \frac{\Delta U_D}{I_D} - K \frac{\Delta U_G}{I_G}}{K \frac{\Delta U_D}{I_D}} \times 100\%$$

式中, I_D 和 I_G 分别表示低频和高频电流, ΔU_D 和 ΔU_G 分别表示供低频电流和供高频电流时, 测量电极 MN 之间的电位差。 K 为电极排列系数。

如果保持 $I_D = I_G$, 则

$$F_s = \frac{\Delta U_D - \Delta U_G}{\Delta U_D} \times 100\%$$

视幅频率, 是指振幅随频率的变化率。目前, 这一术语没有统一。国内有的叫视频散率, 用 P_s 表示, 也有的叫视百分频率效应, 用 B_s 表示; 西方国家叫百分频率效应, 用 F_s 或 FE 表示。

视幅频率与时间域激电中的视极化率 η_s 是相当的。 F_s 的数值与 f_G 和 f_D 的选择有关, 当低频 $f_D = 0$, 高频 $f_G = \infty$ 时, F_s 取得极大值。

然而在实际工作中, 无论视极化率或视幅频率都不能实现极限条件测量。在频率域激发极化法中, 当频率用得太低时, 速度慢, 干扰大; 当频率用得太高时, 会出现明显的感应耦合效应, 因此, 所用低频或高频都远远不是极限频率, 往往是在 0.1Hz 到 5Hz 之间, 很少超过 10Hz 的, 在一般情况下总是:

$$F_s \leq \eta_s$$

在实际工作中, 为了仪器设计上的方便, 常常用下式来定义 F_s

$$F_s = \frac{\Delta U_D - \Delta U_G}{\Delta U_G}$$

测量幅频率的典型方案是用正弦波激励，观测系统对高低频的振幅响应。由于技术的发展，多年来已形成几种观测方案。概括起来，可分为变频方案、奇次谐波方案和伪随机信号方案。

一、变频方案

传统的变频观测方案见图1.1.1。其工作过程是在每个测点上发送机先

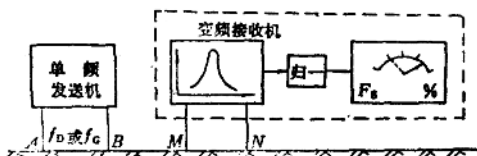


图1.1.1 变频观测方案

发送高频电流，接收机接收高频电位差 V_G ，并进行“归一化”（即调整接收机放大器的增益使表头指到某一固定位置），然后通知发送机发送低频电流，接收机测低频电位差 V_D ，从而得到视幅频率 F_s ：

$$F_s = \frac{V_D - V_G}{V_G}$$

这个方案的缺点是：（1）每个测点要先后分别对高低频进行两次观测，每一个测点观测时间长；（2）发送机要根据接收机操作情况的需要而改变频率，既增加了相互间的联系手续，又难以实现一台发送机供电，多台接收机测量，即使发送机自动换频也难以提高生产效率；（3）高、低频电位差是在不同时间观测的，电流的稳定性及各种干扰对测量结果影响大。

美国出产的Mark-4，加拿大出产的P-660，P-670和上海地质仪器厂出产的DBJ-1变频激电仪，都是属变频仪器。加拿大亨泰克公司出产的M-4在测量幅频率时，也是采用变频方案。

二、奇次谐波方案

到70年代初，出现了奇次谐波方案。其原理见图1.1.2。它是发送机发送一种频率的方波电流（基波电流），接收机测



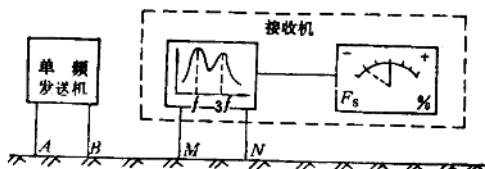


图1.1.2 奇次谐波振幅观测方案

基波电位差 V_f 和三次谐波电位差 V_{3f} ，也可计算 F_s ：

$$F_s = \frac{V_f - 3V_{3f}}{3V_{3f}}$$

这种方案的优点是发送机只发送一种频率，不要换频，生产效率比变频方案高，其缺点是：(1) 用基波与其三次谐波进行 F_s 测量，频差太小，以致 F_s 异常太小，影响找矿效果；(2) 由于三次谐波振幅为基波的 $1/3$ ，影响测量 F_s 的精度；(3) 增高谐波次数，虽可加大频差，但其振幅则更加小了，为了增加振幅便不得不加大电流，使得装备笨重。

加拿大出产的 IPRF-2 是最早的测量奇次谐波的仪器。以后出现的 GDP-12, PDP-8 (美国)，M-4 (加拿大) 等仪器在测量幅频特性时都是采用奇次谐波方案。

三、伪随机方案

发送一种伪随机波形的电流，使其在多个频率上能获得几乎相等的功率谱，可以同时测量系统对多个频点的振幅响应。双频道观测就是一种最简单的伪随机观测方案。

双频道观测方案（见图1.1.3）是发送机同时发送 f_G 和 f_D 两种频率的方波电流，接收机同时测量这两种频率的电位差，通过机内专用计算电路计算出 F_s ，且用 $3\frac{1}{2}$ 位液晶数字自动显示。双频道方案的特点是：(1) 两种频率(f_D 和 f_G)的电流同时供入地下，发送机和接收机都不需改变频率，与变频仪相比，每个测点上的观测速度可提高一倍以上；(2) 一台发送机供电，

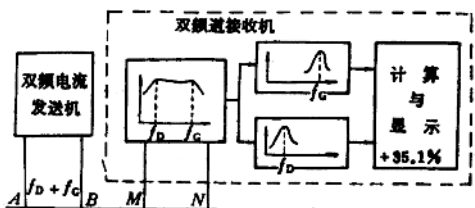


图1·1·3 双频道观测方案和双频道幅频仪示意图

多台接收机同时测量，故效率可提高3倍以上；（3） f_G 与 f_D 之差可以根据需要加以选择，且两种频率矩形波电流的幅度是相近的，与奇次谐波法相比，异常幅度大些，或者在保持异常幅度相同时，双频道方案的供电电流小得多，例如当 $f_G/f_D = 13$ 时，双频道方案需电流仅为奇次谐波方案的 $1/13$ ，当接地电阻相同时双频道方案所需电功率仅为奇次谐波方案的 $1/169$ ，因而大大节省电源，整个供电和发送机系统也变得大为轻便了；（4）两个频率的电位差信号同时观测，所受的干扰条件相同，因而抗干扰能力强，在同样条件下，较变频仪提高10倍以上；（5）发送机不要稳流，使仪器线路简化，并提高了可靠性；（6）可连续读数，操作简便，有利于多次读数，提高观测精度；（7）不要“归一化”，可提高观测速度。

总之，由于本仪器具有上述优点，所以特别适用于激电普查找矿。

S-1型和S-2型的基本原理相同，S-2型是在S-1型基础上的改进型，S-1和S-2可以相互通用。

第二节 双频道数字激电仪的设计思想

S-2双频道数字激电仪在设计上的主要特点如下：

一、发送机向地下发送的是像图1·2·1(a)那样的波形的电

流。它是由低、高两种频率电流合成起来的，图1·2·1中的(b)表示低频电流，(c)表示高频电流，由图不难看出 $I_{AB} = I_D + I_G$ 。



图1·2·1 双频电流

二、低频和高频频率的选择原则是使之在大多数地区的地电条件下，对于金属矿和水文激电均可使用，因此，频率选为：

0.3Hz 3.9Hz (S-1型仪器) 或：

4/13Hz 4Hz (S-2型仪器)

这样的频率对有如下特点：

1. 观测速度快，工作效率高；
2. 在大多数地区，感应耦合的影响可以忽略（例如，做中间梯度，当 $\rho_s > 50 \Omega \cdot m$ 时，AB可达1000m，而感应耦合很小）；
3. 高、低频之差达13倍，使得异常较为明显。

三、为了发挥双频仪轻便的特点，发送机主要用小功率，考虑到器件和价格，因此将发送机定为400VA，即最大电压400V，最大电流1A，以电池供电为主。

四、为了保证仪器的可靠性，发送机备有过流保护电路，并有同步系统。

五、接收机首先采用共同通道将双频电位差同时放大，这样可以降低放大器增益变化对 F_s 测量的影响，提高仪器稳定性。

六、对 V_G 和 V_D 采用同步检波，以提高仪器抗干扰能力。

七、用积分线路测量 V_G 和 V_D 的幅值，这样不但提高了仪

器的抗干扰能力，而且也减小了仪器的过渡过程，提高了仪器的观测速度。

八、用双积分模数转换，它有如下特点：

1. 转换中抗干扰能力强；
2. 由于 V_G 和 V_D 积好分后，立即进行积分转换，因而降低了对高、低两个积分器的保持特性要求；
3. 既进行了数字转换，又自动计算了 F_S ；
4. 由于正向积分后即立即反向积分，因而对积分器零点稳定性要求不需太高。

九、逻辑电路全部采用 CMOS 低功耗器件。模拟部份采用低功耗运算放大器，数字显示采用扭曲型液晶显示器，因而整机耗电省。

十、在 S-2 接收机中设自校电路，不但方便工作，且使精度提高。

第三节 双频道数字激电仪的技术指标

一、S-1 型发送机

1. 工作频率：0.3Hz，3.9Hz 混合双频。

(1) 频率精度： $\Delta f \leq \pm 0.5\% \text{Hz}$ ；

(2) 频率温飘： $\Delta f \leq \pm 0.5\% \text{Hz} / \Delta t = 30^\circ \text{C}$ ；

(3) 频率时飘： $\Delta f \leq \pm 0.5\% \text{Hz} / 4\text{h}$ 。

2. 工作范围：

(1) 外接直流高压 45—400V；

(2) 输出电流：0.01A—1A 连续可调，分 0.1A，0.3A，
1A 三档输出；

(3) R_{AB} 适用范围：10 Ω —10K Ω 。

3. 稳流精度：当电源电压或负载变化 $\pm 10\%$ 时，供电电流

变化 $\Delta I \leq 0.5\% A$ 。

4. 输出功率：最大400W。

5. 过流保护：当输出电流超各测程档满度1.25—2.5倍信号峰值时，过流保护电路工作，并自动切断输出电流。

6. 其他：

(1) 自身功耗： $\leq 450\text{mW}$ ；

(2) 重量：5kg；

(3) 外形尺寸： $300 \times 200 \times 180\text{mm}^3$ 。

二、S-1型接收机

1. 工作频率：0.3Hz—3.9Hz。

2. 电位差测量范围：0.3mV—3V，分八档。

1mV, 3mV, 10mV, 30mV, 100mV, 300mV, 1V, 3V。

3. 幅频率测量范围：0— $\pm 99.9\%$ 。

4. 电位差测程换档误差：不超过 $\pm 2\%$ 。

5. 电位差测程换档假幅频率：不超过 $\pm 0.5\%$ 。

6. 电位差温飘：不超过 $2\%/20^\circ\text{C}$ 。

7. 幅频率温飘：不超过 $0.5\%/20^\circ\text{C}$ 。

8. 电位差时飘：不超过 $2\%/4\text{h}$ 。

9. 幅频率时飘：不超过 $0.5\%/4\text{h}$ 。

10. 输入阻抗：约 $3\text{M}\Omega$ 。

11. 读数方式：电位差，表头直读；幅频率，自动数字显示。

12. 使用电源：直流 $\pm 18\text{V}$ 两组。

13. 自身功耗：小于600mW。

14. 外形尺寸： $300 \times 200 \times 180\text{mm}^3$ 。

15. 重量：4.5kg。

三、S-2型发送机

1. 工作频率: 4Hz, 0.308Hz混合双频;
频率误差: $< \pm 0.05\%$ 。
2. 工作电压: 45—400V直流。
3. 输出电流: 0.01—1A (分 0.1A, 0.3A, 1A 三档输出)。
4. 输出功率: $P_{\max} = 400\text{W}$ 。
5. 过流保护: 输出电流超各档量程1.2倍时, 过流保护动作, 自动切断输出电流。
6. 自身功耗: $< 400\text{mW}$ 。
7. 重量: 5kg。
8. 外形尺寸: $300 \times 200 \times 180\text{mm}^3$ 。

四、S-2型接收机

1. 工作频率: 4Hz和0.308Hz。
2. 电位差测量范围: 0.3mV—3V, 分八档 (1mV, 3mV, 10mV, 30mV, 100mV, 300mV, 1V, 3V)。
3. 幅频率测量范围: $-70.0\% - +99.9\%$ 。
4. 电位差档差: 优于2%。
5. 幅频率档差: 优于0.5%。
6. 电位差飘移: 优于2%/4h。
7. 幅频率飘移: 优于0.5%/4h。
8. 幅频率自校差: 小于0.5%。
9. 读数方式: 电位差, 表头直读;
幅频率, 自动数字显示。
10. 输入阻抗: $3\text{M}\Omega$ 。
11. 自身功耗: 小于700mW。
12. 机内电源: 直流 $\pm 18\text{V}$ 两组。

13. 重量: 4.5kg。

14. 外形尺寸: $300 \times 200 \times 180 \text{mm}^3$ 。

第四节 S-2型仪器与S-1型 仪器的差别

S-2型仪器在S-1型仪器的基础上改进而成。主要差别是:

一、用石英晶体振荡器作为信号源, 使频率稳定度大为提高。

二、频率由S-1型的 $0.3\text{Hz}/3.9\text{Hz}$ 改为 $0.308\text{Hz}/4.0\text{Hz}$ 。这是由于采用 32768Hz 的标准石英晶体, 易于得到 4Hz 和 $4/13\text{Hz}$ 。这样做了后, 还保证了S-1型与S-2型间的通用性, 即S-1发送机可配S-2型接收机, S-2型发送机也可配用S-1型接收机。

三、S-1型发送机采用稳流方式其稳流精度很高, 这在中梯工作时十分方便。S-2型发送机则采用不稳流方式, 它有三处好处:

1. 由于去掉了 240.6Hz 的调制频率, 线间感应可大为减弱;

2. 电源利用率约提高30%;

3. 线路简单, 可靠性提高。

用S-2发送机做中梯时, 可采取发送机定时读电流 (例如每10分钟读一次电流), 接收机用记录时间的方法读电位差, 以保证计算 ρ_s 的精度。

四、接收机中大部分运算放大器均采用日本的场效应管输入的高性能运放, 提高了整机稳定性和精度。

五、接收机加有自校装置, 方便工作, 提高精度。

第二章 S-2发送机电路原理

发送机的任务是同时向地下供出包括高频 4.0Hz 和低频 0.308Hz 的复合电流。发送机整机方框图示于图 2·0·1。其中高压直流电源（外供）、逆变器、斩波器和取样电阻组成供电主回路，其他为逻辑控制部分。

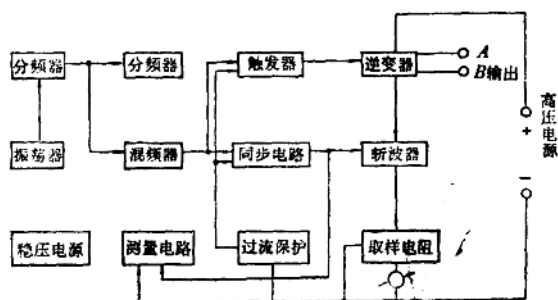


图2·0·1 S-2发送机方框图

振荡器产生 32768Hz 的振荡方波，经分频器后分别得到 4.0Hz 和 0.308Hz 的高、低频方波。混频器将高、低频方波混合后，一路送至触发电路，产生两组触发脉冲，以控制逆变器的可控硅工作；另一路送至同步电路，产生同步方波，以控制斩波器工作。高压直流电源经逆变器、斩波器、取样电阻将直流逆变成包括高、低频的复合双频电流。由输出端“A”，“B”向大地供出。过流保护电路用以保护主回路功率元件，当输出超载时，自动切断供电系统。测量电路通过表头直读供电电流值。稳压电源产生 $\pm 3\text{V}$ 稳定电压，供机内各控制电路工作使用。

以下各节，对发送机各部分电路作较详细分析。

第一节 供电主回路

一、逆变器

用换向开关可以把直流电源（或交流电源）转换为方波输出。此输出方波电流的大小取决于电源的功率和换向开关所容许的电压和电流。由于频域工作中要求换向开关动作的速度比较快，因此采用可控硅逆变器作为换向开关。

可控硅逆变器的工作原理如图2·1·1所示。它由 CT_1, CT_2 和 CT_3, CT_4 两组可控硅组成，与双刀双掷换向开关 K 相当。当可控硅 CT_1, CT_2 导通， CT_3, CT_4 关断时，加到 A 极的电源为正， B 极为负，这相当于开关 K 指向正向供电的位置；若 CT_1, CT_2 关断，而 CT_3, CT_4 导通时，加到 A 极的电源为负， B 极为正，这相当于开关 K 指向反向供电位置，这两组可控硅在程序控制单元的控制下，按一定的频率交替导通，这相当于开关 K 按一定的频率换向。这样，在负载上便得到某一频率的方波电流。

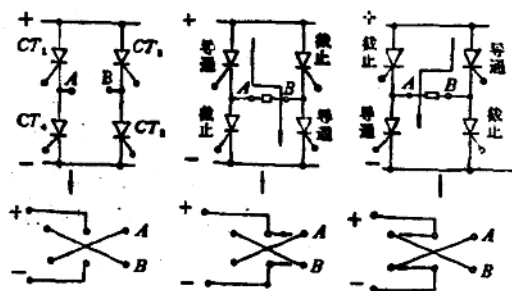


图2·1·1 可控硅逆变器工作原理

二、供电主回路工作原理

图2·1·2为主回路原理图。供电电流从高压直流电源（外