

伪随机三频电法研究^①

何继善

(中南工业大学地质系,长沙 410083)

摘 要

首先分析了变频法和奇次谐波法的优点和缺点。伪随机场源法可以同时测多个频率的视复电阻率,但普通的伪随机场源要求有大功率电源。本文提出一种振幅相等但持续时间不同的正向或负向矩形波系列组成的伪随机三频波作为电法勘探的场源,它所包含的功率绝大部分都集中在三个主频点上,主频点之间的频差可以方便地加以调节。根据我国有色金属矿产多在山区的特点,本文建议优先发展伪随机三频三通道观测系统,它既工作方便,又可节省一半野外工作人员,还可降低仪器成本。用伪随机三频系统进行三个主频点之间的相对相位测量,可以免去从发送机向接收机传递相位参考的麻烦。伪随机三频激电法除了具有很好的发现异常和克服电磁耦合效应能力之外,还可以从各相对相位差之间的关系得出频谱的趋势,从而在普查时,就可以同时得到有关异常源性质的信息,具有很好的推广应用前景。

关键词: 伪随机信号 激电 电磁测深 频谱 相位

1 从变频法到伪随机场源法

本世纪50年代初期是频率域电法的奠基和迅速发展的时期。J. R. Wait 于1950年秋在亚利桑那成功地进行了变频激电法的实验。写著名的论文“变频法”^[1],随后,变频法很快推广到全世界。L. Cagniard 等先后发表了对电磁场波区的研究成果,给出了根据电磁阻抗计算视电阻率的公式^[2]。使大地电磁法和音频大地电磁法迅速发展,成为研究大地构造和寻找油、气田的重要方法。到70年代中期,Myron Goldstein 在此基础上提出了可控源音频大地电磁法^[3],并很快风行全世界。

变频法和可控源音频大地电磁法都是逐个频率分别向地下提供电流来形成场源的,因此,就场源类型而言,都可归为“变频法”。

60年代加拿大的麦克法尔公司推出了IPRF-2型激电仪。它的重要特点是场源为方

波,接收其基波与三次谐波。K. L. Zonge 提出复电阻率法,它是测量方波的基波和各阶奇次谐波的实分量和虚分量^[4]。这类工作,其场源都是方波,而在不同程度上利用了奇次谐波,可归为“奇次谐波法”。

70年代,W. H. Pelton 在犹它大学完成了以频谱激电为核心内容的博士论文^[5],就其测量方式而言,仍属变频法范畴。

人工场源频率域激电法和电磁法有很多种,如变频法、复电阻率法、频谱激电法、CSAMT、频率测深法等等。但如果撇开在野外工作方法上的差别,就其所测的物理量而言,它们有一个共同点,在本质上都是测量复视电阻率随频率的变化,也就是测量复视电阻率的频谱,即测量复视电阻率的振幅谱、相位谱、实谱和虚谱中的一种或几种,变频激电法则是测量振幅谱上两个特定的频点。除绝对精度之外,测定频谱的关键是同一量(如振幅)在各频

^① 本文得到国家自然科学基金资助,于1994年2月5日收到初稿

点测定所具有的相对精度,以保证谱的精度。

变频法是一个频率、一个频率地逐个进行测量,除了工作效率低之外,每个频率所对应的物理量是在不同的时间测量的,所供电流的波形,大小很难保持完全不变,不同时间所受干扰也不相同。因此,所测结果的精度就难于提高,特别是当相邻两频点相差不大时,精度更难满足要求。

奇次谐波法可以在同一时间测量不同频点的量。然而,它有两个致命的弱点:一是相邻频点的频差是固定的,且随着谐波次数的升高,相邻频点越来越近。二是供电电流强度是随着谐波次数升高而下降的,例如:13次谐波的强度只有基波的1/13。在野外条件下,噪声干扰一定时,信噪比随信号减小而降低。因此,各次谐波是在不等精度下测量的。如果供电电流强度只能保证基波的测量精度,那末,谐波精度将不能满足要求。如果加大供电电流使最高次谐波保证了精度,那末,对于基波和其他较低次谐波则是浪费。例如,假设供电电流为10 A便可保证基波所需要的信噪比,又假设最高测到13次谐波,那么为了保证13次谐波的信噪比,则所需供电电流为130 A,在野外条件下要达到这样大的电流,不但需要很大功率的发电机和发送机,而且还要很小的接地电阻。这不仅仅是浪费,限于设备和条件,有时甚至是做不到。

有鉴于变频法与奇次谐波法的上述缺点,作者于70年代提出了伪随机场源法^[6],后来获得国家自然科学基金的资助。双频电流法可作为伪随机场源法的最简单特例^[7],它的优点是可以用频差为任意数而振幅相近的一对频率的电流激励大地,进行激电或电磁测深,使两频点的相对测量精度大为提高,从而很快得到实际推广^[8]。

巧妙地设计伪随机波形可以同时向地下供出多个频率,且它们的振幅相近,频差合理。以此作为供电波形,可以进行伪随机场源法^[9]。然而,所用频率越多,所需场源功率就越大,对于实际的野外仪器,又遇到了难于克

服的问题,特别是对于CSAMT等本来就需要大电流的情况下更是困难。本文提出的伪随机三频法则兼顾了各方面的需要,是一种快、好、省的方法,具有广阔的实用前景。

2 伪随机三频波

伪随机波形既具有某种随机波形特性,又能事先设定,并可以重复地产生和复制。伪随机波形可以有无限多种,图1是长度为31的伪随机波的波形图和功率谱。由图可见,它在图示的时间内是无规则的,即随机的,但它以31的长度重复出现,因而是易于控制和发生的。它在从 ω_0 到 $10\omega_0$ 的功率谱幅度变化不大,因此,可以一次同时测10个频点。如果将要求适当放宽,则还可以增加几个频点。既提高了测量速度,又提高了谱的精度。然而,这种波形有两个缺点:从电法勘探方法上说,希望所有频点在对数坐标上是均匀分布,上述波形频点太密;并且 $10\omega_0$ 以上仍有很多频点不能利用。这两个缺点导致电源功率的利用率低。因此,它在对电源功率利用率要求不高的情况下,(例如室内模拟实验)使用较好,对于野外工作,复合序列的伪随机波是更为合适的。有

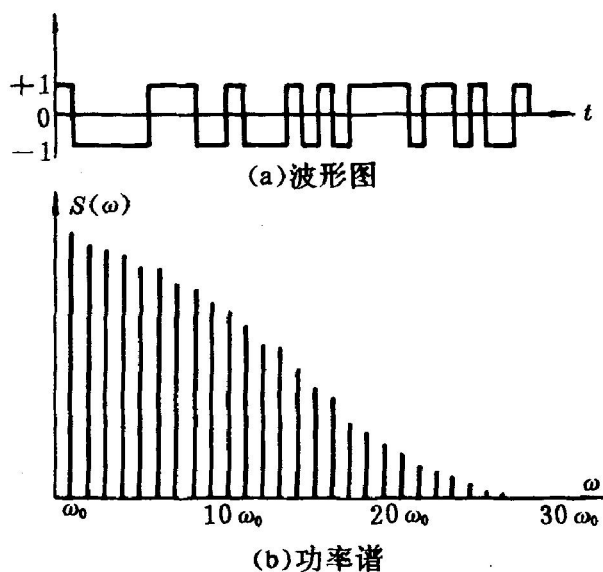


图1 长度为31的伪随机信号的波形图和功率谱

关伪随机波形的研究在另文中论述,本文直接提出一种特殊的伪随机波—伪随机三频波。

伪随机三频波是笔者为电法勘探场源专门设计的一类波形,它们是由幅度相等但时间间隔不同的正或负向矩形波系列组成的,也可以有无限多种,可根据具体情况加以选择。伪随机三频波有如下共同特性:

(1)波形所含功率绝大部分集中在三个频点上,我们将此三频点称为主频,将这三个频点从低到高定义为低主频点(f_1)、中主频(f_2)和高主频点(f_3),图2举了两个伪随机三频波形的例子,由于它们是周期的,它们的振幅谱都是线谱,在所取时间坐标情况下,令矩形波的振幅为1,它们的振幅表达式分别为:

对于图2a,

$$b_n = \frac{2}{n\pi} (1 + \cos n\pi - 2\cos \frac{n\pi}{4}) \quad (1)$$

三个主频的振幅分别为:

$$b_1 = 0.9003, b_2 = 0.6366, b_4 = 0.6366$$

对于图2b,

$$b_n = \frac{2}{n\pi} (1 + \cos n\pi + 2\cos \frac{n5\pi}{8} + 2\cos \frac{n\pi}{2} + 2\cos \frac{n\pi}{8} - 2\cos \frac{n11\pi}{16} - 2\cos \frac{n9\pi}{16} - 2\cos \frac{n3\pi}{16} - 2\cos \frac{n\pi}{16}) \quad (2)$$

三个主频振幅分别为:

$$b_1 = -0.6626, b_4 = 0.6366, b_{16} = 0.6366$$

可见能量都集中在三个主频上。

(2)三个主频点之间的间隔可以方便地加以改变,例如图2a波形三个主频的频差为 $f_2/f_1 = f_3/f_2 = 2$, 而图2b的则相应为 $f_2/f_1 = f_3/f_2 = 4$, 这就使得将伪随机波形用于电法勘探时,有很好的适应能力,无论是用于三频点的激电法,或者是组成频谱激电,或者是进行CSAMT或频率测深等都十分方便。

3 伪随机三频双通道电法勘探系统

伪随机三频波的波形有无限多种,组成电

法勘探系统的方案也可以有很多个。根据我国国情,笔者建议首先发展双通道的伪随机三频系统(简称三频双道系统)。如图3所示,该系统的发送机发送伪随机三频波形电流(或电磁波),接收机用三电极双通道,对于接收机而言,中间电极作为公共“地”。另一附加通道在必要时用来监测发送电流,如果是进行绝对相位测量(即以发送电流为参考测量电位差的相位),此通道作为隔离的放大器,其数据传到接收机的计算机。如果是测量相对相位或只测振幅,此通道也可不用,以简化野外数据检测。

国外目前的电法勘探仪器几乎没有例外地都是用方波供电,而接收机则向多通道发展。例如,美国Zonge Engineering Research Organization的GDP-16多功能电法系统和加拿大Phoneix的V-5多功能系统都是供方波和8通道接收。虽然,发展多通道系统是一种可取的方案,然而我国有色金属矿多产于山区,地形起伏,交通不便,不少地方还植物覆盖,通视条件不好。在这种情况下,接收通道数目太多,不一定可取。以八通道为例,若电极距为40m,则一次布线的首尾距为280m,(如果将一个通道用来监测发送电流,7通道接收电位差,则为240m),通讯和照顾都不方便。采用三频供电,同时测三个频点,效率比方波单频供电的高三倍,再采用双通道接收,在效率上也就等于6通道接收,工作速度与上述8通道的系统相当。但三频三通道系统只需三个测量电极,将接收机放在中间,前后只有一个电极距的距离,照顾方便。一人操作仪器,三人跑极也就够了。而单频8通道系统则需再增加四人跑极,并且要七个电极都安置好了以后才能观测。由于沿测线上道路、通视等条件的差别,其所需辅助时间较三电极的常常要长。因此,三频三通道系统不但可以比上单频八通道系统,而且野外人员可以减少一半,接收机的价格也至少可以降低3/5。

多通道接收机存在选择哪一个点为公共“地”的问题。例如,如果顺序有1、2、3、4、5、

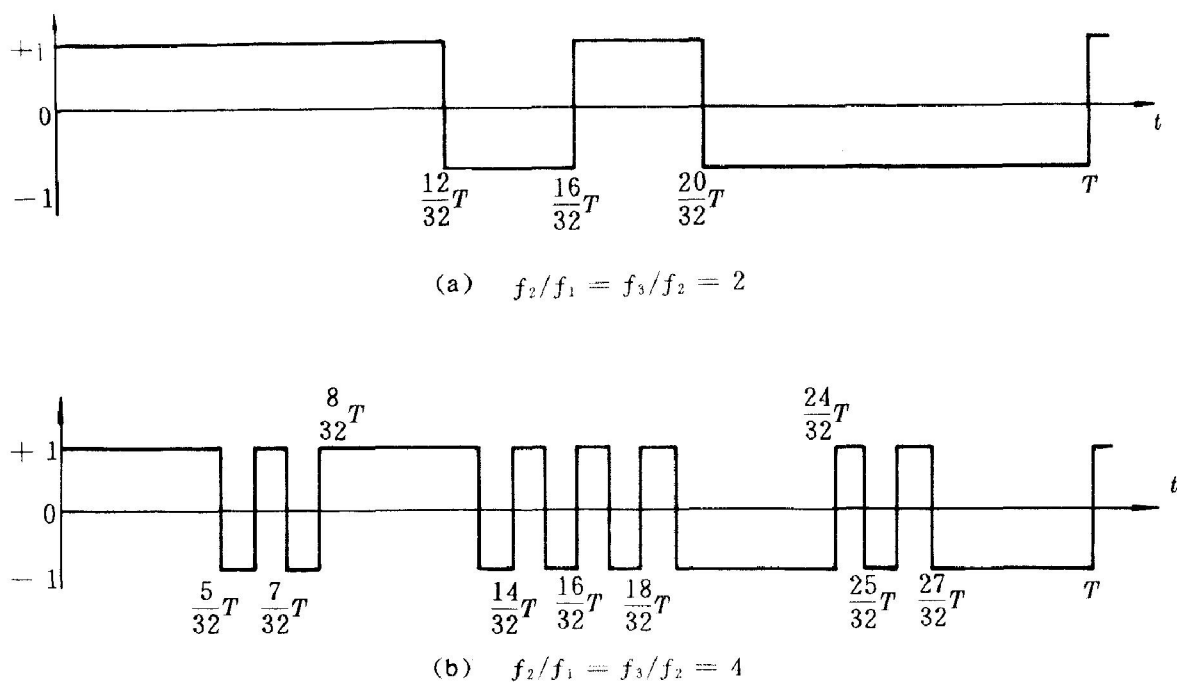


图2 伪随机三频波举例

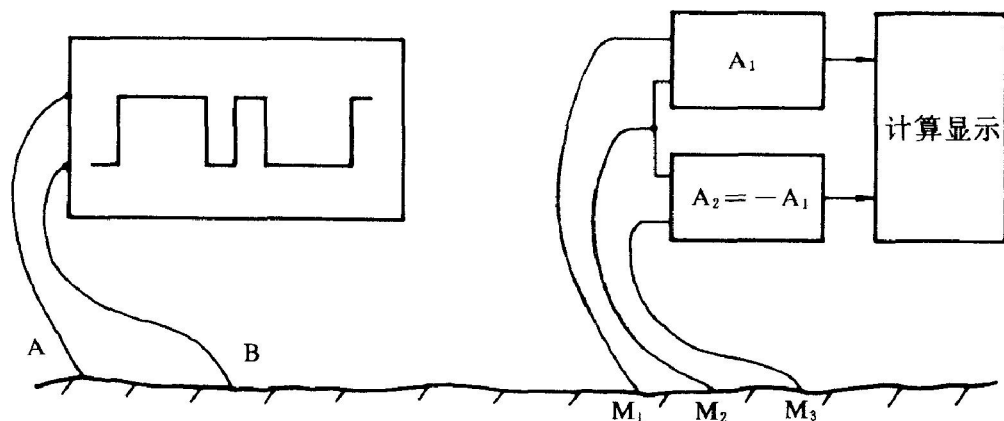


图3 伪随机三频双通道观测系统

6、7等电极，假设以第1个电极公共地，则1、2两电极间所测信号为 ΔV_{12} ，但1、3两电极所测信号为 ΔV_{13} 而不是 ΔV_{23} ， ΔV_{23} 等于 $\Delta V_{13} - \Delta V_{12}$ 。这样一来， ΔV_{23} 就不是直接测到的量。为了得到它要多做一次减法，因而降低了精度。

为了克服这一问题，在多道测量中，可以用“浮地”的办法。即接收机各个通道放大器彼此隔离，各有自己的“地”，这样就可以直接测到 ΔV_{12} 、 ΔV_{23} 、 ΔV_{34} …。但为了使各放大器

很好隔离，要采取一些措施，必然增加成本。

采用双通道则十分简便，可以只用三个电极，以第2个电极（即中间的电极）为公共地，便可以直接测量到 ΔV_{12} 和 ΔV_{23} 。

上面所说的是建议优先发展三频双通道，但并不是说一定不发展更多通道，随着电子技术的发展，更多通道也不难做得很轻便。然而，即使这样，伪随机三频供电的多通道接收也远比方波供电的多通道接收优越，除了速度可提高三倍之外，下面将看到，从方法上说还有其

自身优点。

4 伪随机三频系统的相对相位测量

在各种频率域电法中,除了测量振幅作为基本量之外,人们还常常希望测量相位,这是因为相位在某种意义上说是振幅对频率的微分^[10],有较高的分辨能力。通常都是以发送电流的相位为参考相位,来测量电位差相对于电流的相位移。为此,就需要解决如何传输或确定参考相位的问题,不外有三种途径。用两个高稳定的同步石英钟保持接收机发送机的同步是一种方便的方法。但石英钟总是会有飘移的,稳定度越高也就越贵,并且,同步石英钟需要恒温系统,也增加仪器重量。将发送机的相位参考信号用电缆或光缆传送到接收机是一种十分可靠的方法,然而,接收机要拖一根电缆,甚是不便,当收发距很远时就特别困难。用无线电波发送相位参考信号虽然可以去掉电缆,然而,各种干扰以及无线电波传输中的附加相移都会带来误差。

用伪随机三频场源,可以无需相位参考,而直接测量三个频点复电阻率的相对相位差。

前面已经提到,复电阻率法、CSAMT法、频率测深法等方法的野外工作方式不同,所测频谱的频带范围不同,但就物理量而言,都是进行视复电阻率的频谱测量。

如果采用电流作为相位参考,测量绝对相移,三频法与变频法不同的是每次测量三个频率,效率提高了三倍。在做频谱测量时,主要的测量时间是花在低频段,这时,如果采用图2a的波形,供一次电流就测了三个频点,如果频率做到很低时这就特别重要。

如果不用电流作参考而测量相对相移,那末,根据不同的情况可以采用不同的方式。

现以CSAMT为例来说明相对相位测量的两种不同的基本方式。CSAMT最常用(从高频到低频)2分频的频率系列,例如8192Hz、

4096Hz、2048Hz、1024Hz、512Hz…等等。一种方式是用图2b的波形并保持不变,但每次将基频按4分频降低,如表1所示。

每次供电重复一个频率。对振幅来说,起到了质量检查的作用。对于相位来说,则保持了相对相位的可比性,形成完整的相对相位谱曲线。

第二种方式则是保持高主频的频率不变,例如固定为8192Hz,每次改变波形,使低主频和中主频,逐次按4分频降低,所得结果在理论上与前一方式是一样的。

表1 基频按4分频降低数据表

次序	低主频/Hz	中主频/Hz	高主频/Hz
1	2048	4096	8192
2	512	1024	2048
3	128	256	512
4	32	64	128
5	8	16	32
6	2	4	8
7	0.25	0.5	2
8	0.0625	0.125	0.25

除了上述两种基本方式之外,如果是进行频谱激电工作,为了进行非线性研究,还可以采用其他方式。例如:保持波形不变,每次重复两个频点,或者既重复一个频点又改变波形。

需要指出的是,对某一特定的频率的正弦波来说,两个信号的相位差也就是它们之间某一特定点之间的时间差,所谓某一特定点通常是定义为从负到正的过零点。对于频率不同的两个正弦波来说,某一时间差所对应的相位值与频率成正比。因此,在计算相对相位差时,要注意到相的频率关系。

在恢复成完整的相位谱曲线时,还要注意到相对相位谱曲线实质上是振幅谱曲线对频率的微分。从相对相位谱曲线所得到的相位谱曲线与用电流作参考相位所得的(绝对)相位谱之间有一个位移,这一位移也就是最高频率的相

位。但由于在解释相位谱曲线时,都是着眼于其变化。这一位移并不影响对资料的解释。并且,在测量中,同时还得到了振幅谱,而振幅(ρ)与相位(φ)之间有如下关系^[10]:

$$|\rho(\omega)| = \rho(\infty) - \frac{2\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{y \cdot \varphi(\omega)}{y^2 - \omega^2} dy \quad (3)$$

$$\varphi(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{\ln|\rho(\omega)|}{y^2 - \omega^2} dy \quad (4)$$

因此,对比实测的和理论的振幅与相位谱可以求出这一位移。

5 伪随机三频激电系统

伪随机三频系统可以用来进行频率域激电测量,一次供电可以测量三个频点的电位差振幅 ΔV_1 、 ΔV_2 和 ΔV_3 ,除了可以计算出对应三频点的视电阻率之外,还得到两个基本幅频率 F_{12} 和 F_{23} 以及平均的幅频率 F_{13} :

$$F_{12} = \frac{\Delta V_2 - \Delta V_1}{\Delta V_1} \quad (5)$$

$$F_{23} = \frac{\Delta V_3 - \Delta V_2}{\Delta V_2} \quad (6)$$

$$F_{13} = \frac{\Delta V_3 - \Delta V_1}{\Delta V_1} \quad (7)$$

同时还可以得到这三个频点的两个基本相对相位差 $\Delta\varphi_{21}$ 和 $\Delta\varphi_{32}$ 以及高、低两个主频之间的相位差 $\Delta\varphi_{31}$ 。

如图4所示,根据 $\Delta\varphi_{21}$ 和 $\Delta\varphi_{32}$ 两者之间的相对关系可以得到相频特性的基本趋势。当 $\Delta\varphi_{21} < 0$, $\Delta\varphi_{32} < 0$ 时,三个频率都位于相位极值点的低频一侧,或者说相位极值频率高于

f_3 , 参看图4中的曲线3。而且,如果 $|\Delta\varphi_{21}| < |\Delta\varphi_{32}|$ 或二者相近,且数值较大,说明相位极值距 f_3 较远。若 $|\Delta\varphi_{21}| > |\Delta\varphi_{32}|$,且 $\Delta\varphi_{32}$ 数值小,则说明 f_3 已接近相位极值。若 $\Delta\varphi_{21}$ 为负、 $\Delta\varphi_{32}$ 为正,且二者的数值都不大,则说明 f_3 位于相位极值附近。如果 $\Delta\varphi_{21}$ 和 $\Delta\varphi_{32}$ 为正,则说明 f_1 高于相位极值频率,类似地可以分析二者的数值大小,估计极值频率的位置。

由于幅频特性与相频特性之间有内在的联系,对于幅频率 F_{12} 和 F_{23} 之间的相对大小也可用来帮助分析相频特性。

从上可见,伪随机三频激电法可在一次供电的条件下,也就是在不增加野外测量时间,或者说不增加费用情况下,得到多个参数,虽然没有进行频谱测量,但可以估计谱的趋势和某些特征,从而对异常源的性质作出初步判断。例如,如果工作地区存在浸染硫化金属矿和碳质地层,前者的相位极值频率高,后者的极值频率低。如果频率组(f_1 、 f_2 、 f_3)选择合理,而所得异常的 $\Delta\varphi_{21}$ 和 $\Delta\varphi_{32}$ 均为负,则说明异常是硫化金属矿引起的可能性大。

由于同时得到了三个频点的振幅和相对相位,据此可以发现和校正电磁感应耦合。为了进一步对异常进行研究,可作若干组三频测量而形成频谱测量。

6 结语

所有频率域电法都是对视复电阻率谱的测

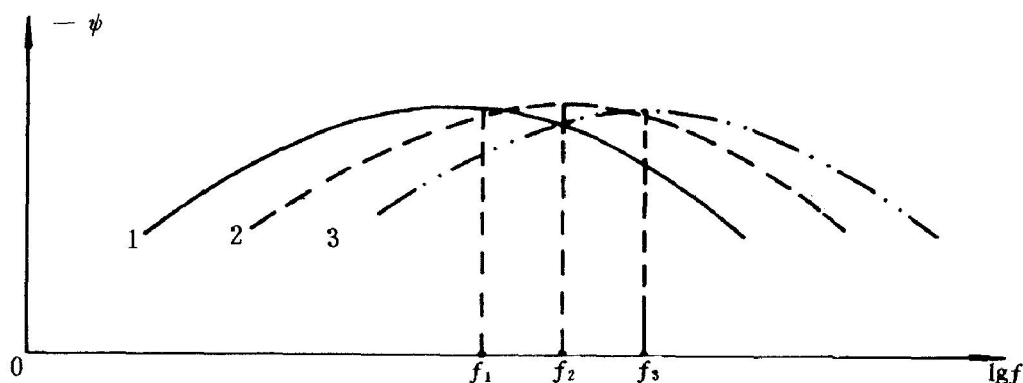


图4 伪随机三频激电波的相对相位

量,根据视电阻率谱的变化来研究激电效应或进行电阻率测深。变频法和阻抗理论的论证是频率域电法的奠基性工作,奇次谐波的利用,双频道电法的发明和伪随机三频电法是频率电法方法发展的几个阶段。

伪随机三频电法的实际应用不但将明显地提高电法勘探的效率,而且对方法本身的研究,如激电与电磁耦合效应,激电的非线性效应等的研究均将有所促进。

参考文献

- 1 Wait J R. Variable frequency method, In: Overvoltage research and geophysical application, Pergamon Press, New York and Oxford, 1959.
- 2 Cagniard L. Geophysics, 1953, 18: 605—635.
- 3 Goldstein M A and Strangway D W. Geophysics, 1975, 40: 669—683.
- 4 Zonge K L and Wynn J C. Geophysics, 1975, 40: 851—864.
- 5 Pelton W H *et al.* Geophysics, 1978, 43: 588.
- 6 何继善. 伪随机信号复电阻率法, 湖南省地质学会论文集, 1982, 3.
- 7 何继善. 双频道交流激电法的初步研究, 中南矿冶学院学报, 1978, 9(2).
- 8 何继善等. 双频道激电法研究. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1989, 12.
- 9 何继善等. 伪随机激电谱研究报告, 1988, 12.
- 10 He Jishan. JCSMM, 1986, 4.