

变频法中电磁耦合的近似校正方法

战 克 王继伦

前 言

在变频激电法的解释推断中,电磁耦合的识别与校正是物探工作者十分注意的一个问题。关于偶极装置和中间梯度装置的电磁耦合校正方法已有文章发表^{〔1〕〔2〕}。贺来秀三对偶极装置的电磁耦合问题还做了进一步的探讨^{〔3〕}。我国的邓祖棣同志提出了“高频系数改正法”^{〔4〕},罗延钟同志提出了“利用多频测量作变频法电磁耦合的校正法”^{〔5〕},都是很有意义的工作。但由于影响电磁耦合的因素很复杂,上述诸方法都只能是近似的方法。通过理论计算和模型实验,我们总结了激电效应和电磁耦合效应各自表现的规律,导出校正公式,制出具体的校正方法。我们所提出的方法也不例外,仍然是一种近似的方法。现介绍如下。

方 法 原 理

1. 纯激发极化作用下视电阻率 $\rho_s^{IP}(f)$ 、视频率效应 $P_s^{IP}(f_D, f_G)$ 与频率 f 之间的关系:

在目前变频法的工作频率内,由纯激发极化引起的视频率效应与两个相应频率之比的倒数呈线性关系^{〔6〕}。其表达式为:

$$P_s^{IP}(f_D, f_G) = \frac{\Delta \rho_s^{IP}(f_D, f_G)}{\rho_s^{IP}(f_D)} = K_s \lg \frac{f_G}{f_D} \quad (1)$$

$$\Delta \rho_s^{IP}(f_D, f_G) = \rho_s^{IP}(f_D) - \rho_s^{IP}(f_G) = \rho_s^{IP}(f_D) K_s \lg \frac{f_G}{f_D} \quad (2)$$

$$\text{从而, } \rho_s^{IP}(f_G) = \rho_s + \Delta \rho_s^{IP}(f) = \rho_s^{IP}(f_D) [1 - K_s \lg \frac{f}{f_D}] \quad (3)$$

式中 $P_s^{IP}(f_D, f_G)$ 是以低频归一的视频率效应;

$\Delta \rho_s^{IP}(f_D, f_G)$ 是低频与高频测量视电阻率的差值; $\rho_s^{IP}(f)$ 、 $\rho_s^{IP}(f_D)$ 、 $\rho_s^{IP}(f_G)$ 是频率分别为 f 、 f_D (某个低频) 和 f_G (某个高频) 时的视电阻率; ρ_s 是纯电阻率值; K_s 是以 f_D 为基准频率的归一化的视频率效应; $\Delta \rho_s^{IP}(f)$ 是在某个频率激电作用形成的 ρ_s 变化值。上述符号上标 “IP” 均表示纯激电作用的条件。

2. 纯电磁耦合作用下视电阻率 $\rho_s^M(f)$ 、电磁耦合效应 $M(f_D, f_G)$ 与频率 f 之间的关系:

分析“均匀大地上频率域中梯装置的电磁耦合”^{〔2〕}理论计算结果、“非均匀介质中电磁耦合模型实验”^{〔7〕}的结果以及国外的有关资料^{〔1〕〔8〕},可以得出如下认识:纯电磁耦合作用在变频法测量中所显现的电阻率变化,在某个频段内可用频率的某个幂函数近似地表达。即在双对数坐标系中可近似地分段用直线描述,要注意的是在电磁耦合效应大于60%时应避免测量的整个频段过宽,以防破坏这一线性关系。相应的表达式如下:

$$\rho_s^M(f) \rho_s = \rho_s + \Delta \rho_s^M(f) - \rho_s + k f^a \quad (4)$$

$$\Delta \rho_s^M(f_D, f_G) = \rho_s^M(f_D) - \rho_s^M(f_G) = -k f_D^a \left[\left(\frac{f_G}{f_D} \right)^a - 1 \right] \quad (5)$$

$$M(f_D, f_G) = \frac{\Delta \rho_s^M(f_D, f_G)}{\rho_s^M(f_D)} = -k f_D^a \left[\left(\frac{f_G}{f_D} \right)^a - 1 \right] \cdot \frac{1}{\rho_s^M(f_D)} \quad (6)$$

式中符号的上标“M”均表示纯电磁耦合的条件，相应的其它符号的意义与(1) — (3)式的符号同。 $M(f_D, f_G)$ 是相应频段上用 $\rho_s^M(f_D)$ 归一化的电磁耦合效应值， k 是电磁耦合作用的强度系数， a 是表征电磁耦合作用的幂指数。 k 与 a 在同一测点的选定频段上均为待定常数。

3.在激发极化与电磁耦合作用同时存在的情况下，实测的视电阻率 $\rho_s(f)$ 与视频率效应 $P_s(f_D, f_G)$ 的表达式：

这二种作用同时存在时，实测的视频率效应是二者矢量合成后的幅值。这时二种作用各自变化的规律仍然存在，但具体的量值（如 K_s 、 k 、 a ）与单纯一种作用的值稍有不同。例如表达电磁耦合的幂函数关系式形式不变，但已经是一组新的幂函数。这就是将实测的视频率效应中电磁耦合的具体影响用频率的某个幂函数来模拟，可以认为这一概念上的转化已使新的幂函数包括了相位差的影响。这里要考虑的是，电磁耦合作用加入后总的效应与纯激电效应之间存在着相位差，现在从总效应的幅值中来分解出的两种效应，只能是每一种效应单独存在时在总效应方向上的投影。从目前变频法使用的频段看，其高、低频间的相位差影响不大，故不予考虑。这样，可将某个频率测得的视电阻率值 $\rho_s(f)$ 看做三个有关参数的总和，并依其规律写为：

$$\rho_s(f) = \rho_s + \Delta \rho_s^{IP}(f) + \Delta \rho_s^M(f) = \rho_s^{IP}(f_D) \left[1 - K_s \lg \frac{f_G}{f_D} \right] + k f^a \quad (7)$$

$$\Delta \rho_s(f_D, f_G) = \Delta \rho_s^{IP}(f_D, f_G) + \Delta \rho_s^M(f_D, f_G) = \rho_s^{IP}(f_D) K_s \lg \frac{f_G}{f_D} - k f_D^a \left[\left(\frac{f_G}{f_D} \right)^a - 1 \right] \quad (8)$$

$$\text{因而：} P_s(f_D, f_G) = \frac{\Delta \rho_s(f_D, f_G)}{\rho_s(f_D)} = \frac{\rho_s^{IP}(f_D)}{\rho_s(f_D)} K_s \lg \frac{f_G}{f_D} - \frac{k f_D^a}{\rho_s(f_D)} \left[\left(\frac{f_G}{f_D} \right)^a - 1 \right] \quad (9)$$

式中 $\Delta \rho_s(f_D, f_G)$ 是实测的低频与高频间视电阻率的差值， $P_s(f_D, f_G)$ 是实测的以某个低频视电阻率归一化的视频率效应。

4.求解方法：

A.首先分析(7)式结果，其中包括四个未知数： $\rho_s^{IP}(f_D)$ 、 K_s 、 k 和 a ，为求解可列出四个方程式，这样只要实测某一频段上四个频率的视电阻率值，就可求出四个未知数达到校正电磁耦合的目的。但直接解较繁，这里推荐在实测低频视电阻率之后接着顺序测量以这个视电阻率归一的三个视频率效应时的解法。

据(9)式可列出方程组：

$$\left. \begin{aligned} P_s(f_D, f_{G1}) &= \frac{\rho_s^{IP}(f_D)}{\rho_s(f_D)} K_s \lg \frac{f_{G1}}{f_D} - \frac{k f_D^a}{\rho_s(f_D)} \left[\left(\frac{f_{G1}}{f_D} \right)^a - 1 \right] & \text{①} \\ P_s(f_D, f_{G2}) &= \frac{\rho_s^{IP}(f_D)}{\rho_s(f_D)} K_s \lg \frac{f_{G2}}{f_D} - \frac{k f_D^a}{\rho_s(f_D)} \left[\left(\frac{f_{G2}}{f_D} \right)^a - 1 \right] & \text{②} \\ P_s(f_D, f_{G3}) &= \frac{\rho_s^{IP}(f_D)}{\rho_s(f_D)} K_s \lg \frac{f_{G3}}{f_D} - \frac{k f_D^a}{\rho_s(f_D)} \left[\left(\frac{f_{G3}}{f_D} \right)^a - 1 \right] & \text{③} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

取 $f_{G1} > f_{G2} > f_{G3}$ 并用 X 和 Y 分别整理方程(10)中的②、③式的前后二项, 则有:
 $P_s(f_D, f_{G1}) = X - Y$

$$\left. \begin{aligned} P_s(f_D, f_{G2}) &= \frac{\lg \frac{f_{G2}}{f_D}}{\lg \frac{f_{G1}}{f_D}} X - \frac{(\frac{f_{G2}}{f_D})^a - 1}{(\frac{f_{G1}}{f_D})^a - 1} Y \\ P_s(f_D, f_{G3}) &= \frac{\lg \frac{f_{G3}}{f_D}}{\lg \frac{f_{G1}}{f_D}} X - \frac{(\frac{f_{G3}}{f_D})^a - 1}{(\frac{f_{G1}}{f_D})^a - 1} Y \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 $X = \frac{\Delta \rho_s^{IP}(f_D, f_{G1})}{\rho_s(f_D)} = \frac{\rho_s^{IP}(f_D)}{\rho_s(f_D)} K_s \lg \frac{f_{G1}}{f_D} \quad (12)$

$$Y = \frac{\Delta \rho_s^M(f_D, f_{G1})}{\rho_s(f_D)} = \frac{k f_D^a}{\rho_s(f_D)} \left[\left(\frac{f_{G1}}{f_D} \right)^a - 1 \right] \quad (13)$$

在(11)式中的三个未知数 X 、 Y 和 a 可以通过三个实测数据求出。进一步可再用实测数据 $\rho_s(f_D)$ 由(12)、(13)式得出 $\Delta \rho_s^{IP}(f_D, f_{G1})$ 、 $\Delta \rho_s^M(f_D, f_{G1})$, 并从(7)、(5)和(1)式求出 $\rho_s^{IP}(f_D)$ 、 k 及 K_s 。

通过以上的解析可知(7)式中的四个未知数均可由实测一个低频视电阻率和相应的三个视频率效应值求出。

B. 在上述A法的基础上, 可对主要参数给出近似解法。这更为简单, 在绝大多数情况下, 其精度与A法相似。经由(11)式求出 X 、 Y 和 a 之后, 从(12)、(13)和(6)式可得出:

$$P_s^{IP}(f_D, f_{G1}) = \frac{X}{1 - \frac{Y}{(\frac{f_{G1}}{f_D})^a - 1}} \doteq X \quad (14)$$

$$M(f_D, f_{G1}) = \frac{-Y}{\Delta \rho_s^{IP}(f_D)} \doteq \frac{-Y}{1 - X} \quad (15)$$

将(14)式的结果代入(1)式即求出 K_s 。这种近似解法只要用三个视频率效应就简便地恢复了激电效应值, 并给出了电磁耦合效应值和 K_s , 这说明在方程组(11)解出后, 就基本实现了电磁耦合的校正。如实测了 $\rho_s(f_D)$, 也可以求 k 等其它有关参数。

校正的具体方法

下面以P660、(P670)仪器的工作频率为例说明具体的校正方法。

1. 量板法:

结合P660仪使用的频率, 以 $f_{G1} = 5.0$, $f_{G2} = 2.5$, $f_{G3} = 1.25$, $f_D = 0.3125$ (位单为赫, 下同), (11)式可具体写为:

$$\left. \begin{aligned} P_s(0.3125, 5.0) &= X - Y \\ P_s(0.3125, 2.5) &= \frac{3}{4}X - \frac{8^a - 1}{16^a - 1}Y \\ P_s(0.3125, 1.25) &= \frac{1}{2}X - \frac{4^a - 1}{16^a - 1}Y \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

进一步整理得:

$$\begin{aligned} P_s(0.3125, 1.25) &= \frac{4^a - 1}{16^a - 1} P_s(0.3125, 5.0) + \left(\frac{1}{2} - \frac{4^a - 1}{16^a - 1} \right) X \\ P_s(0.3125, 1.25) &= \frac{4^a - 1}{8^a - 1} P_s(0.3125, 2.5) + \left[\frac{1}{2} - \frac{3(4^a - 1)}{4(8^a - 1)} \right] X \end{aligned} \quad (17)$$

对于(17)式, 只要 a 给定, 就可以绘出以 X 为参变量的 $P_s(0.3125, 5.0)$ 与 $P_s(0.3125, 1.25)$ 之间关系曲线和 $P_s(0.3125, 2.5)$ 与 $P_s(0.3125, 1.25)$ 之间关系曲线。这是二组平行的倾斜直线, 也就是相应给定 a 的电磁耦合校正量板。其斜率分别为 $\frac{4^a - 1}{16^a - 1}$, $\frac{4^a - 1}{8^a - 1}$,

截距分别为 $\left[\frac{1}{2} - \frac{4^a - 1}{16^a - 1} \right] X$, $\left[\frac{1}{2} - \frac{3(4^a - 1)}{4(8^a - 1)} \right] X$ 。图1绘出以 $a = 1.6$ 为例的幅量板, 可改变 a 的值做出一套这种量板备用, a 的取值范围按需要决定, 一般在1.0~2.5之间, a 的变化间隔为0.1即可。

使用时, 以实测的 $P_s(0.3125, 5.0)$ 、 $P_s(0.3125, 1.25)$ 和 $P_s(0.3125, 2.5)$ 、 $P_s(0.3125, 1.25)$ 这二对频率在估计的 a 量板上分别查取 X 值, 若这个 a 估计得正确, 则在两组倾斜直线上分别查取的 X 值相等。若查出的 X 值不相等, 则说明 a 估计得不当, 要重新选 a , 直到查出的 X 值相等为止, 查量板也就是解方程组(16), 这时的 X 与相应量板上的 a 值就是方程组(16)的解, Y 值由(18)-①式确定, 量板法可结合求解方法“B”节的近似解法一道使用, 由(14)式可知, 在 Y 值与 $16^a - 1$ 相比不可忽略时, 应对 X 进行修正。在绝大多数情况下, 查得的 X 就是 $P_s^{IP}(0.3125, 5.0)$, 即:

$$P_s^{IP}(0.3125, 5.0) = \frac{X}{1 - \frac{Y}{16^a - 1}} \doteq X \quad (18)$$

如果工作地区的布线规整, 当地电情况单一, a 值变化不大, 其值已确定时, 则只用两个实测的 P_s 值在一张相应 a 的量板上就可进行粗略的校正。总的看来, 量板法求解的优点是简便、直观, 缺点是 a 不连续, 尽管可以用内插法使 a 变化间隔满足一定的误差要求, 但因量板数不能过多, 所以相对下述的解析法来说还有不足之处。

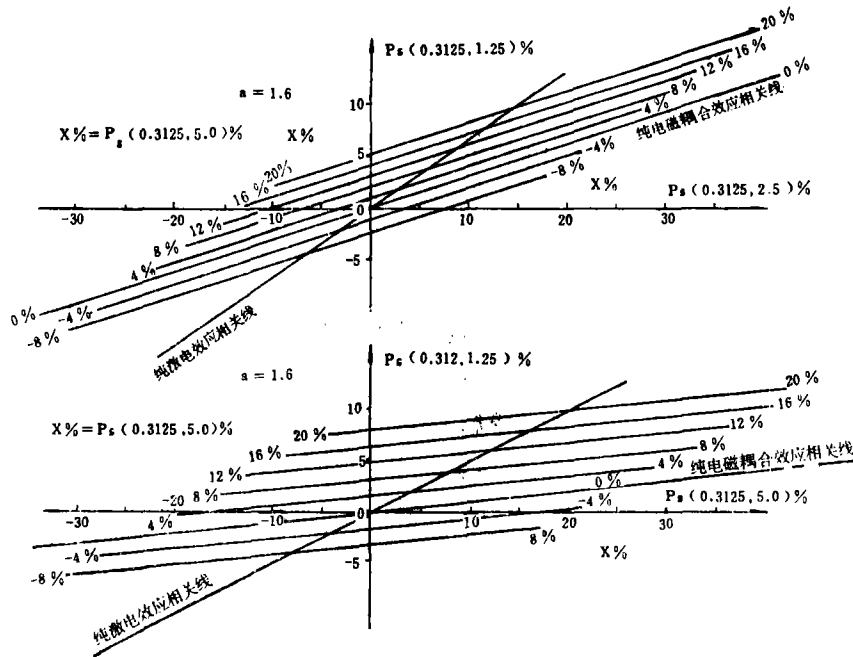


图1 电磁耦合校正量板 ($a = 1.6$)

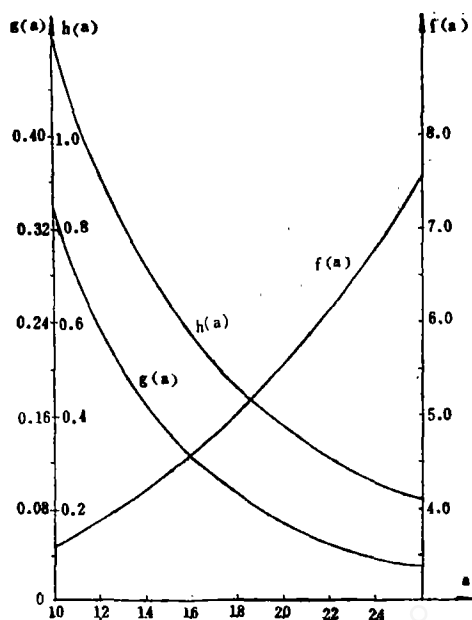


图2 解析法中的 $f(a)$ 、 $g(a)$ 、 $h(a)$ 函数曲线

2. 解析法:

这种方法在实质上也是解方程组(16)。为了简便,假定三个与 a 相关的函数 $f(a)$ 、 $g(a)$ 和 $h(a)$ (实际上只用两个即可),这三个函数均由(16)式导出:

$$f(a) = \frac{P_s(0.3125, 5.0) - 2P_s(0.3125, 1.25)}{P_s(0.3125, 2.5) - \frac{3}{2}P_s(0.3125, 1.25)} = \frac{16^a - 2 \times 4^a + 1}{8^a - \frac{3}{2} \times 4^a + \frac{1}{2}} \quad (19)$$

$$g(a) = \frac{Y}{P_s(0.3125, 5.0) - 2P_s(0.3125, 1.25)} = \frac{4^a - 1}{16^a - 2 \times 4^a + 1} \quad (20)$$

$$h(a) = \frac{Y}{P_s(0.3125, 2.5) - \frac{3}{2}P_s(0.3125, 1.25)} = \frac{4^a - 1}{8^a - \frac{3}{2} \times 4^a + \frac{1}{2}} \quad (21)$$

将这三个函数预先绘出并置于一张图上,见图2。从(19)式可知,实测了三个视频率效应之后就可由其间的相互关系由图2 $f(a)$ 曲线确定 a 值,用这个 a 值通过同一张图就查出相应的 $g(a)$ 或者 $h(a)$ 的函数值,则有:

$$\begin{aligned} Y &= g(a)[P_s(0.3125, 5.0) - 2P_s(0.3125, 1.25)] \\ &= h(a)[P_s(0.3125, 2.5) - \frac{3}{2}P_s(0.3125, 1.25)] \end{aligned} \quad (22)$$

$$X = P_s(0.3125, 5.0) + Y \quad (23)$$

至此方程组(16)式已经解出,一般用求解方法“B”的近似解法即可。根据需要,也可利用实测的 $P_s(0.3125)$ 数值由(13)、(14)、(7)、(5)、(1)式的关系解出 $\Delta P_s^{IP}(0.3125, 5.0)$ 、 $\Delta P_s^M(0.3125, 5.0)$ 、 $\rho_s^{IP}(0.3125,)$ 、 k 和 K_s ,并由上述有关的值得出:

$$P_s^{IP}(0.3125, 5.0) = \frac{\Delta P_s^{IP}(0.3125, 5.0)}{\rho_s^{IP}(0.3125)} \quad (24)$$

$$M(0.3125, 5.0) = \frac{\Delta \rho_s^M(0.3125, 5.0)}{\rho_s(0.3125) - \Delta \rho_s^P(0.3125, 5.0)} \quad (25)$$

解析法只要预先绘出如图2的函数曲线, 稍作简单计算就可求解方程组(16)。这是我们推荐的一种方法。但量板法与解析法也可以相互辅助使用, 如图2中查出a后就方便了量板法。反之, 若电磁耦合效应值太小难以用解析法定a值时, 在量板上就直观地显现为符合纯激电效应的相关线。

实例

目前尚无符合要求的多频实测资料, 图3是利用江西D山两个频段的实测资料进行校正的例子。因为只有二个频段, 所以不能逐点对a进行选定。图3b是供电线与测线相距10米时在a=1.8的量板上统一进行校正的结果。其形态、大小与时间域长脉冲的测量结果颇为相近, 并与地质剖面资料相符(需要说明的是这两次观测时间相距8年, 现在矿体正在开采, 所以最近在105~113点多次测得的异常值均较8年前的原始异常值小)。这说明方法原理中给出的模式是可行的, 也说明在某些情况下用选定a值的简单校正方法也可以取得较好的效果, 但基础是a值要选择正确。图3a是供电线与测线相距100米, 供电线呈半矩形布置, 供电电极仍在测线上, 这种布线使耦合效应大为减小。但由图可见, 高频10赫时, 测量结果中的电磁耦合作用仍很强, 并掩盖了激电异常。挑选相应的量板(a=1.5), 统一校正后取得了恢复异常的效果, 只是形态稍有改变。可能供电线位置和所处的地质情况有所变化, 以致很难用一种a值对整条曲线进行改正。也就是说, 在只有两个工作频段时, 正确地选定a值有其局限性。如果有三个频段, 实测资料是可以逐点按给定模式选取a值, 取得无人为因素的校正结果的。

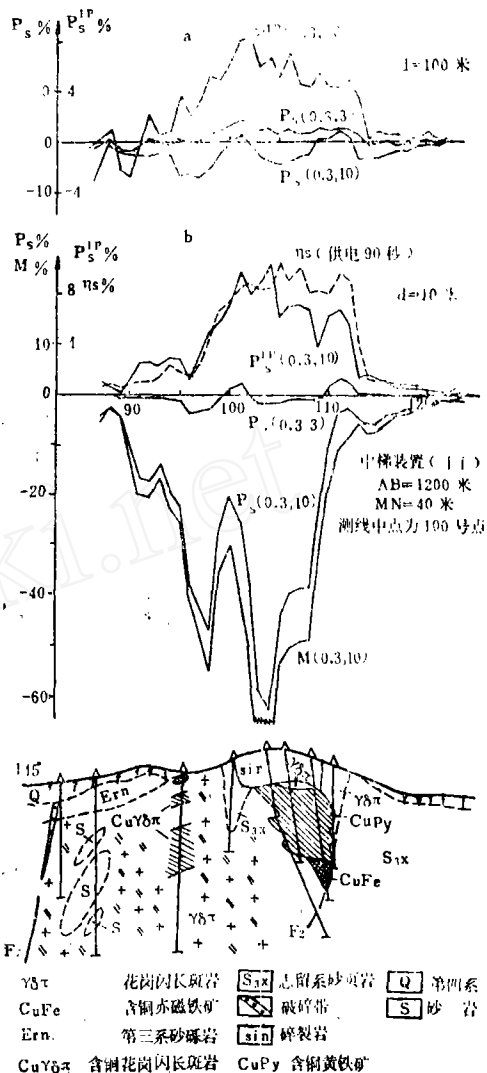


图3 江西D山3线电磁耦合的校正

【结 语】

所讨论的变频激电法中的电磁耦合校正方法, 是通过多频测量分解出的一个参数得出的。这里还有其它参数, 例如 $M(f_d, f_g)$ 。能否利用, 有待探讨。图3b中给出了一条 $M(0.3, 10)$ 的曲线。

文中主要针对中梯装置进行讨论, 但这种校正方法也适用于其它装置。要注意的是, 对于偶极—偶极装置, 一般K值的符号与中梯装置的相反, 故有关式中Y项前的符号应为正值, 在量板上更为简便, 只是将每组倾斜直线向激电效应相关线的右侧延伸, 这样, 不管电磁耦合的实际影响是增大还是减小观测值, 只要在相应的量板上查出X即可, 中梯装置与对称

四级装置均在单纯激电效应相关线的左侧查到X, 偶极—偶极装置大多在激电效应相关线的右侧查到X。

关于校正的误差问题。由于这种求解方法主要是用所测数值之间的比例关系, 故对系统观测误差有压制作用, 传递误差一般都比较小。要注意的是频率间隔较小的视频率效应值(如: $P_s(0.3125, 1.25)$), 这个值的观测误差影响最大, 所以要尽量观测准确。另外, 测量尽量在校准好 $\rho_s(f_D)$ 之后一次完成, 这不仅提高工作效率, 主要是使随机干扰的影响最小。

江西省地质局物探队提供了宝贵的实测资料, 谨此致谢。

参 考 资 料

- (1) Frank B. Millett, 'Part E, Electromagnetic Coupling of Collinear dipoles on a uniform half-Space' Mining Geophysics I 401—419
- (2) 战克、朱宝汉, 《物探与化探》, 1981年第1期
- (3) 贺来秀三, 日《物理探矿》, 19卷第4、5号
- (4) 邓祖栋: 电磁耦合及改正方法, 地质总局变频激电会议专题报告
- (5) 罗延钟, 《地质与勘探》, 1980年第10期
- (6) J. B. 维特, 变频法, 《地球物理勘探专辑》第7辑
- (7) 阎立光、沈连金, 非均匀介质中电磁耦合的模型实验, 冶金部物探公司专题报告

电阻率法在个旧矿区的应用与效果

西南冶金地质勘探公司物探队 曹显光

问题的提出

个旧矿区的找矿向物探工作提出来的主要任务是: 1. 寻找深部硫化矿和浅部氧化矿; 2. 圈定控制成矿中心的隐伏花岗岩的起伏形态; 3. 在浮土覆盖区寻找含矿断裂带。该区的物性参数从表1可见:

1. 花岗岩基本上没有磁性, 氧化矿磁性不大, 硫化矿埋藏太深, 而浮土磁性干扰较大。曾大面积做过磁法, 但效果不佳。

2. 花岗岩与围岩(个旧灰岩)的密度和弹性波速度相差均不大, 硫化矿与围岩虽有密度差, 但埋藏深, 地形切割, 重力法没有取得明显效果。地震法因受条件、设备等限制未作研究。

3. 由于矿床氧化深度大(大多在300米以上), 山形过滤电场强, 以致大面积使用自然电场法也没有取得地质效果。

4. 花岗岩、氧化矿和断裂带的电阻率与围岩有3~10倍的差异, 具备寻找这些地质体的物性前提。但矿区存在着各种强大干扰, 为此, 在开展电阻率法工作时, 应对干扰

表 1

物性 参数 岩矿 石名称	电阻率 $\Omega \cdot m$	磁化率 $10^{-6} CGSM$	密度 g/cm^3	地震波速 km/S
个旧灰岩	4.8×10^3 2.8×10^4	0	2.6~2.7	4~5
花 岗 岩	4×10^2 1.5×10^3	$0 \sim 5 \times 10^2$	2.6	5~5.9
夕 卡 岩	1.1×10^2 1.2×10^3	60		5.1
硫 化 矿	0.0n $n \times 10^2$	$n \times 10^3$	3.7~4.4	5
氧 化 矿 断 裂 带	1.3×10^3 $n \times 10^2$ 1.5×10^3	1×10^3		
浮 土	10~ $n \times 10^3$	$0 \sim 10^4$		

逐一进行研究, 予以消除或压抑到最小程度。

几种主要干扰的研究

一、地形影响的干扰 在山区作电阻率