

瞬变电磁测深法对导电层的探测能力*

牛之琏

(中南工业大学·长沙市)

中心回线装置是瞬变电磁测深法的最佳工作装置,所用的参数 S_r 优于 ρ_r 。理论计算及野外实例说明,此法对导电层具有很强的探测能力,更适应于煤田及深部多金属矿层的勘查。

关键词: 瞬变电磁测深; 中心回线装置; 视纵向电导



物探与化探

瞬变电磁测深法 (TEMS), 是一种观测纯异常的方法, 可在近场源区观测, 相对于其他测深法而言, 优点是: 对地层的分辨能力强, 受侧向影响 (或体积效应) 小, 受地形影响也小, 不存在静偏移效应, 探测深度大。目前已有能探测数公里深的各种仪器装备, 能完成构造填图、油气田、煤田、地热、金属矿产、地下水、冻土带, 以及海洋地质等方面的探测和研究任务。

我国目前试用的仪器方法属于近区的方法, 在探测 1km 内目的层时, 采用中心回线装置, 回线与目的层处于最佳耦合状态, 受旁侧影响小, 其“聚焦”性最佳。

“两高夹一低”的 H 型或 KH 型地电断面, 是煤田及深部多金属矿床常见的地电断面类型。因此, 本文主要讨论在用中心回线装置的情况下, ρ_r 和 S_r 两参数对导电层的探测能力, 列举实例说明并指出需要注意的问题。

方法原理

瞬变电磁测深法, 以人工控制的脉冲电

磁场为激发场源, 在脉冲电磁场的间歇期间, 观测大地在脉冲电磁场激发下的瞬变电磁响应。由于脉冲电磁场包含有各种不同的频谱成分, 所观测的响应实际上就是大地对于各频谱成分响应的褶积值; 它包含有大地岩层的电性及几何参数等方面的信息。当脉冲电磁场源突然被切断, 大地中感应产生的涡流场在开始瞬间集中在场源附近地表, 然后随着时间的延长向下、向外扩散。其扩散速度与岩层的电性有关, 大致与岩层的电阻率的平方根值 $\sqrt{\rho}$ 成正比。因此在地表可观测到随时间衰减的瞬变电磁场, 从而获得反映地下岩层电性及几何形态等方面的信息。

发送脉冲电磁场可用两端接地的电偶源或线源, 也可以用不接地的回线产生, 回线的尺寸及供电电流的大小, 由所要求的探测深度而定, 脉冲电流的波形一般是用双极性方波^[1]。在脉冲间歇期间, 用多匝线圈或有磁芯的多匝线圈 (探头), 观测感应电压 (e) 的衰变, 它反映了多磁场 (B) 的时间导数值 ($-\partial B/\partial t$), $-\partial B/\partial t = e/M_R$ (以 nV/m^2 为单位), M_R 为接收线圈的偶极矩 (线圈匝

* 本课题得到国家自然科学基金资助; 理论计算使用了盛姪姪编制的一维正演程序; 王国原、王隆平参加了计算工作。

数与面积和电流的乘积)。

观测资料的整理, 一般都将实测的 $\partial B/\partial t$ 值换算成视电阻率 ρ_r 及视纵向电导 S_r 值。 ρ_r 的换算, 目前主要使用以晚期定义的计算公式^[1], 对于中心回线及重叠回线装置的计算式为:

$$\rho_r(t) = \frac{M_T^{2/3} \mu_0^{5/3}}{20^{2/3} \pi t^{5/3} (\partial B/\partial t)^{2/3}} \quad (1)$$

式中 ρ_r 的单位为 $\Omega \cdot m$; M_T 为发送磁矩 (回线面积与发送电流的乘积); $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m (即亨/米)。

对于各种深度范围内的多层断面, 可以用位于各个不同深度 h_r , 并且纵向电导 S_r 值与各个断面对应相等的导电薄层加以等效, S_r 及 h_r 的计算式可利用水平薄板的电磁场表达式推导出来^[2]。 S_r 、 h_r 分别称为视纵向电导及视探测深度对于中心回线装置的计算公式为:

$$S_r = \frac{16\pi^{1/3}}{(3M_T \cdot M_R)^{1/3}} \cdot \frac{[\varepsilon(t)]^{5/3}}{[\partial \varepsilon(t)/\partial t]^{4/3}} \quad (2)$$

$$h_r = \left[\frac{3M_T \cdot M_R}{16\pi S_r \cdot \varepsilon(t)} \right]^{1/4} - \frac{t}{\mu_0 \cdot S_r} \quad (3)$$

S_r 的单位为 S (西门子); h_r 的单位为 m。式中 $\varepsilon(t)$ 为某个采样时刻 t 在接收回线中的感应电压, $\frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t}$ 为该时刻 t 的 $\varepsilon(t)$ 微分。

通常是利用 S_r-h_r 曲线类型图中确定出曲线斜率变化的转折点, 划分出岩层界面的视深度和各个层位的视纵向电导值。

导电薄层的瞬变电磁响应

中心回线及重叠回线装置的情况下, 水平导电薄层的电磁响应可由下式确定^[1]:

$$-\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{3M_T}{\pi S} \cdot \frac{1}{(2t/S\mu_0 + 2h)^4} \quad (4)$$

在晚期, $t/S\mu_0 \gg h$, 故

$$-\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{3M_T \mu_0^4 S^3}{16\pi t^4} \quad (5)$$

可见, 晚期响应的标志是按 t^{-4} 幂函数规律

衰减, 它不是 h 的函数, 可根据 (5) 式确定导电薄层的纵向电导值 S 。晚期响应对参数 S 具有很高的灵敏度和分辨能力:

$$-\frac{\partial B}{\partial t} \propto S^3$$

图1、2分别为不同纵向电导水平层上的 $-\partial B/\partial t-t$ 响应曲线和 $-\partial B/\partial t-S$ 关系曲线。从理论计算的结果表明: 进入晚期响应的重要标志是, 在双对数坐标纸上, 曲线呈斜率为 -4 的直线段。根据统计, 当无量纲的归一化时间 $t/\mu_0 L S \approx 1$ 时进入晚期, 也就是说, 不同 S 值的薄层进入晚期的起始时间并不一致, S 大者将晚于 S 小者。在曲线的前

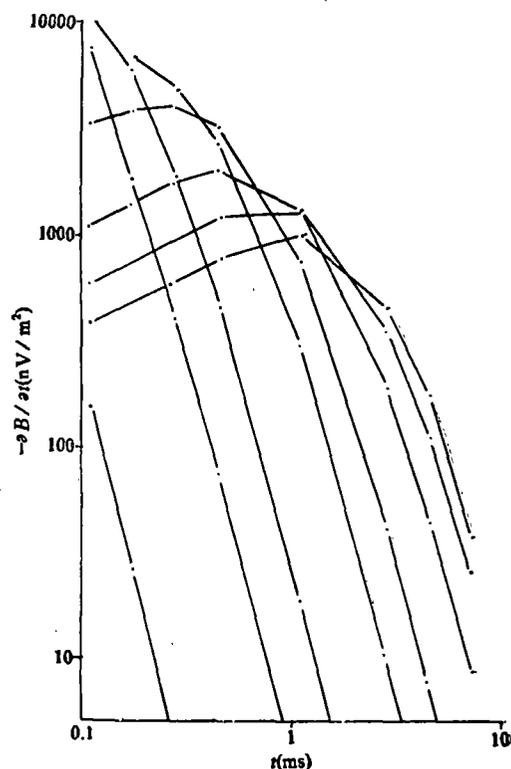


图 1 不同纵向电导水平薄层的 $-\partial B/\partial t-t$ 响应曲线

(中心回线装置, 发送磁矩 $M_T = 18$ 万 $A \cdot m^2$)

支, 不同 S 值的曲线相交, 使其在早期段 S 大者的响应值小于 S 值小者, 与晚期的规律正相反。从图2可见, 对于某个采样时间 t , S 值在某个范围内时, 响应值出现极大值, 它随采样时间的后延, 向大 S 值的方向

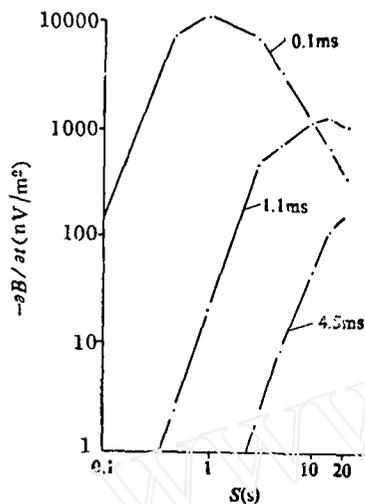


图2 $-\partial B/\partial t-S$ 关系曲线

偏移。可见， S 值与异常响应之间并不存在简单的线性关系，增大 S 值并不一定导致异常响应的增大。

下面利用(5)式讨论最小可分辨纵向电导值 S_{\min} 的问题，取 $-\partial B/\partial t$ 为最小可分辨信号值 η ，一般取 $\eta \approx 0.5 \text{ nV/m}^2$ ；取 t 为信号衰减到 η 时的时间 t_n ，取 $t_n = 5 \text{ ms}$ ；设野外所用的中心回线大小为 $250 \times 250 \text{ m}^2$ ，所供的电流 $I = 10 \text{ A}$ ，则

$$S_{\min} = \left[\frac{16\pi\eta t_n^4}{3M_T\mu_0^4} \right]^{1/3} \approx 0.3S$$

如进一步增大 M_T 和减小 η 的值， S_{\min} 还有可能减小。可见瞬变电磁方法对于导电层的分辨能力很强，只要在围岩响应的背景上能划分出来，就有可能查明。例如，在围岩电阻率为 $1000 \Omega \cdot \text{m}$ 的高阻区用上述装置，可计算得围岩响应的 $t'_n \approx 3.3 \text{ ms}$ [2]；然而 $S = 0.3S$ 的水平薄层响应的 $t_n \approx 5 \text{ ms}$ ，它有可能被查明。

ρ_τ 曲线对导电层的探测能力

层状大地的 ρ_τ 曲线受多种因素的影响，例如地电参数、采样时间、发送磁矩及最小可分辨的信号电平等。下面利用一些正演计算的结果，分析讨论中心回线装置对于H型

断面的探测能力。曲线以 $\rho_\tau(t)/\rho_1 \sim \tau_1/h_1$ 的关系绘于双对数坐标纸上，为突出弱异常响应；取对数坐标纵轴的模数大于横轴。 $\tau_1 = \sqrt{2\pi\rho_1 t} \cdot 10^7$ 称为扩散参数，以米为量纲。

为对比各种测深法对目标层的分辨能力，通常是对各种方法的等值作用范围进行相互对比。它是由于层参数的变化而所能引起曲线之间差别的尺度。也就是说，等值作用范围窄的方法对断面具有较大的分辨能力。前人研究的结果表明 [1]，近区瞬变电磁测深法比起远区瞬变电磁测深法、频率域测深法及直流测深法的分辨能力都高。此外，对于导电层的分辨能力高于对高阻层的分辨能力。有关这方面的论述，本文不再赘述。

为了结合我国南方煤田及深部金属矿田的地电条件来阐述问题，我们对 $\rho_1 = \rho_3 = 300 \Omega \cdot \text{m}$ ， $h_1 = h_2 = 200 \text{ m}$ ，改变 ρ_2 值；以及取 $\rho_2 = 20 \Omega \cdot \text{m}$ ，改变 h_2 值的一系列H型断面作了正演计算。为了探索应用于勘查推伏煤系或勘查低阻层覆盖下深部金属矿层的可能性，也计算了少量KH及HKH型断面的正演曲线。

对于H型三层断面，在讨论 ρ_τ 曲线对低阻层的探测能力时，我们取 ρ_τ 曲线与 $\rho = \rho_1 = \rho_3$ 的均匀大地上的视电阻率 ρ'_τ 曲线之间的均方差 P 作为标准，其计算式为：

$$P = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\frac{\rho_\tau(t_j) - \rho'_\tau(t_j)}{\rho'_\tau(t_j)} \right]^2 \right\}^{1/2},$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

式中 n 为取样道数，它取决于信号衰减到最小可分辨电平 η 时的取样道时间 t_n 。考虑到 ρ_τ 的观测精度，取 P 的下限值为15%，即当 $P \geq 15\%$ 时认为从 ρ_τ 曲线可探测出目标层。图3中 $S_2 = 2$ 的曲线 $P \approx 15\%$ ，故可确定出当 $S_2/S_1 \geq 2$ 时，可从 ρ_τ 曲线被探测出中间的低阻层。我们也对 $\rho_1 = \rho_3 = 500 \Omega \cdot \text{m}$ ， $\rho_2 = 20 \Omega \cdot \text{m}$ 的断面做过计算，其结果是，当 $h_2/h_1 \geq 1/10$ 时，可以有效地分辨中间低

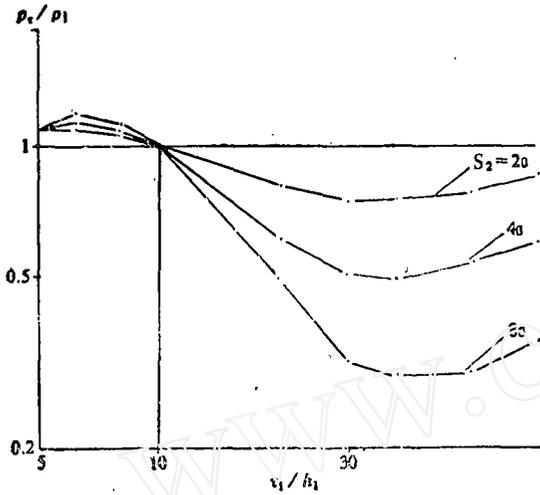


图 3 H型断面 ρ_r 曲线

中心回线装置, $M_T = 625000 \text{Am}^2$; $\rho_1 = \rho_3$
 $= 300 \Omega \cdot \text{m}$; $h_1 = h_2 = 200 \text{m}$

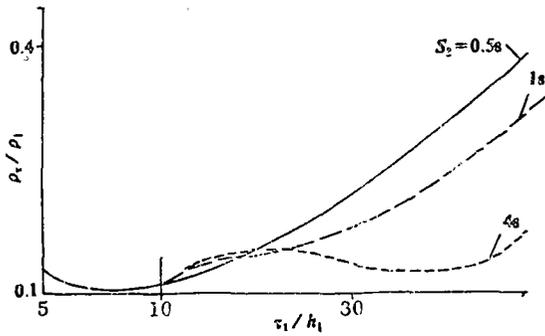


图 4 KH型断面 ρ_r 曲线 I

中心回线装置, $M_T = 625000 \text{Am}^2$; $\rho_1 = \rho_3$
 $= 20 \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_2 = 100 \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_3 = 300 \Omega \cdot \text{m}$;
 $h_1 = h_2 = 200 \text{m}$, 改变 h_2

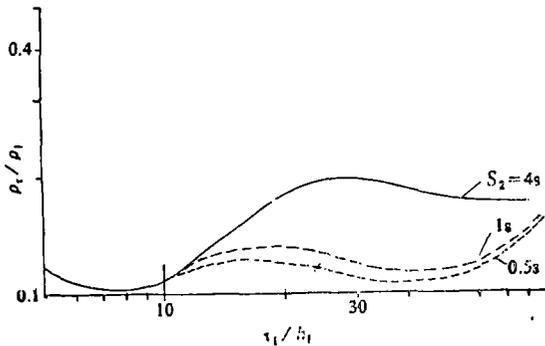


图 5 KH型断面 ρ_r 曲线 II

中心回线装置, $M_T = 625000 \text{Am}^2$; $\rho_1 = \rho_3$
 $= 200 \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_2 = 300 \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_3 = 100 \Omega \cdot \text{m}$;
 $h_1 = h_2 = 200 \text{m}$, 改变 h_2

阻层, 若换算成 S_2/S_1 的关系, 其结果同上述结果相近。

由图4、5可见, 对于KH型断面, 能否从 ρ_r 曲线分辨出低阻层 ρ_3 与 h_2/h_1 及 h_3/h_1 的值有关, 其分辨能力将随着 h_2/h_1 的减小或 h_3/h_1 的增大而增强, 不过 h_3/h_1 的影响比较明显。

在实际工作中, 单纯地从 ρ_r 曲线识别地电断面的类型, 往往比较困难, 需要结合测区地质及岩层电性资料选定初始参数值, 用电子计算机进行反演。

S_r 曲线特征及其对导电层的分辨能力

前面已提及, $\rho_r(t)$ 曲线是原始观测 $e(t)$ 曲线的转换曲线, 经过这种变换使观测场与地电断面的特征直观地联系起来。但它并没有给出层参数间的量的联系, 层参数的反演还需要作近似计算, 或使用计算机进行反演运算。然而从图6可见, 依据 $S_r(h_2)$ 曲线斜率变化的转折点, 划分出岩层界面的视深度及各个层位的视纵向电导值, 可以直观地表示出断面类型及反演系数。

我们已熟悉, 瞬变电磁场在大地中是随时间 t 向下和向外扩散的, 某一时刻 t 对应着某一 $S_r(t_1)$ 及 $h_e(t_1)$ 值; 当瞬变电磁场在高阻层中扩散时, $S_r(t)$ 曲线呈缓慢上升的线段; 当通过低阻层时, $S_r(t)$ 曲线的斜率明显增大。可见, 据 $S_r(h_2)$ 曲线确定出来的是界面的视深度及层位的视纵向电导, 对于KH断面而言, 视深度要比真实深度偏小, 视纵向电导要比其真实值偏大, 需要作校正。由于不同类型的断面校正系数并不相等, 所以需要依据测区的断面类型, 从足够数量的理论计算结果求得适用于该测区的校正系数值。这样解释深度的精度可以达到5~10%。

图6中特别值得注意的是, 与 $S_r(t)$ 曲线第一个转折点①对应的的时间 t_1 位于 $e(t)$ 响应开始受 ρ_2 层影响的时刻, 比起 ρ_r 曲线出现极

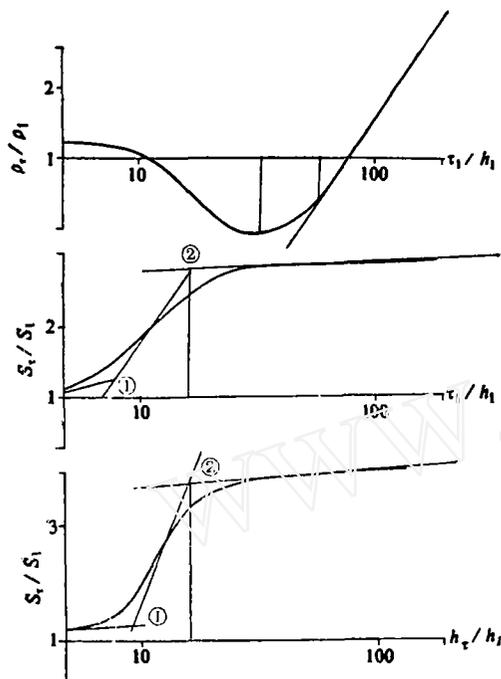


图6 H型断面 $\rho_r(t)$ 、 $S_r(t)$ 、 $S_r(h_r)$ 曲线对比图

中心回线装置, $M_T = 625000 \text{Am}^2$; $\rho_1 = 200 \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_2 = 50 \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_3 \rightarrow \infty$; $h_1 = h_2 = 200 \text{m}$

小值所对应的时间提早了10多倍。与 $S_r(t)$ 曲线第二个转折点②对应的时刻 t_2 位于 $\varepsilon(t)$ 响应开始受 ρ_3 层影响的时刻, 比起 ρ_r 曲线达到尾部渐近线时所对应的时刻也提早了10多倍。这种时间的提早, 使我们所利用的是 $\varepsilon(t)$ 曲线前段(大信号段), 因此 $S_r(h_r)$ 反演的可靠性要比 $\rho_r(t)$ 好。这种时间的提早, 使我们用中、小功率的仪器系统也可能探测比较深的目标层。利用(2)、(3)式可见

$$S_r \propto [\varepsilon(t)]^{1/3} \cdot \left[\frac{\partial \varepsilon(t)/\partial t}{\varepsilon(t)} \right]^{-4/3}$$

$$h_r \propto [\varepsilon(t)]^{-1/3} \cdot \left[\frac{\partial \varepsilon(t)/\partial t}{\varepsilon(t)} \right]^{1/3}$$

因此, 即使 $\varepsilon(t)$ 曲线存在系统误差, 只要曲线衰减规律不发生多大变化, 对 S_r 、 h_r 的换算值影响是不大的。

在实际应用中值得注意的是, 目前国内使用的仪器系统起始采样时间较晚(一般为

0.7ms), 又没有对早期采样值作必要的改正, 所以往往对浅层探测能力很差或被漏掉。此外, 对于 $\rho_2 < \rho_1$ 的断面, 有可能使早期 $\varepsilon(t)$ 值畸变, 也会影响到确定第一层参数的精度。

实例

在湘南铅-锌-金矿上的探测效果:

矿床赋存于侏罗系砂、砾岩层与石炭系和二叠系的砂页岩、灰岩的不整合接触硅化破碎带(Q-Bf)中, 上覆白垩系红层(K₁d)。矿层由多个矿体组成, 总厚度10~20m, 是一宽数百米、走向长数公里的水平层, 埋深

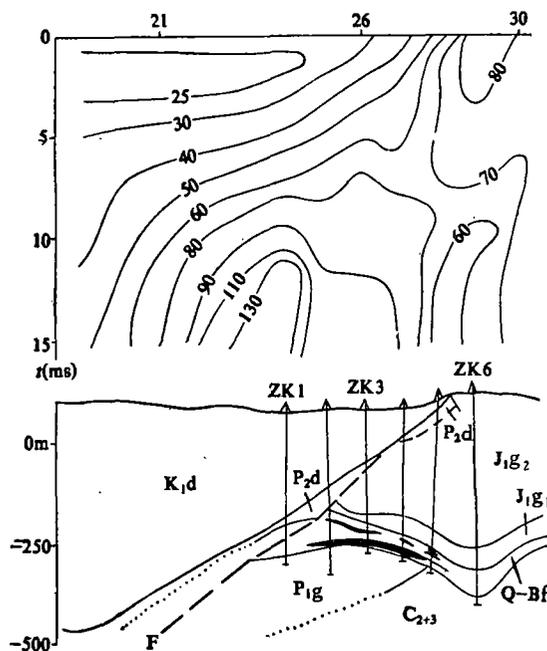


图7 湘南铅-锌-金矿1号剖面 ρ_r 拟断面

(重叠回线装置, 边长 $L = 200 \text{m}$, $I = 5 \text{A}$)

K₁d—白垩系红层, J_{1g}—侏罗系砂、砾岩层,

P_{1,2}—二叠系砂页岩和灰岩, C₂₊₃—石炭系砂页岩和灰岩, Q—Bf—硅化破碎带, 含矿层

约300m。铅锌金矿石与黄铁矿共生, 呈现良导电性。红层电阻率仅数十欧姆米, 构成低阻覆盖层。侏罗系砂岩电阻率约数百欧姆米, 下伏老地层的电阻率 $> 1000 \Omega \cdot \text{m}$ 。

从图7可见, ρ_r 拟断面图很清晰地反映

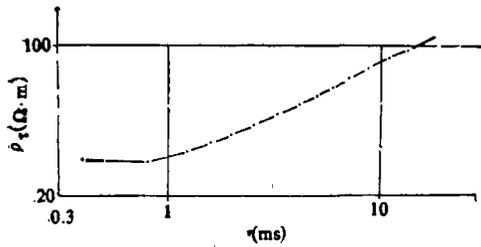


图 8 在钻孔ZK3旁的测深曲 $\rho_r \sim t$ 曲线
(发送回线边长 $L=200\text{m}$, $I=5\text{A}$)

ZK3孔旁TEMS反演与钻探结果比较表

层次	1	2	3	4
地 层	K, d	J ₁	矿层	P, C
钻探结果(m)	0~150	150~310	310~330	330
反演 ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	30	253	11	1110
结果 h (m)	0~142	142~306	306~327	327

了红层起伏形态及深部高阻老地层的隆起,与浅层地震资料及所附的地质剖面相当吻合。不过,对矿层的反映并不明显,只是根据 $60\Omega \cdot \text{m}$ 等值线封闭圈圈出的反映有点模糊。图8是位于矿层正上方进行井旁测深的 $\rho_r \sim t$ 曲线,曲线形态与图4中 $S_3=0.55S$ 曲线相似,呈KH型,第3层的响应不大容易分辨。使用美国引进的Anderson反演程序,在VAX11/780机上利用 $\varepsilon(t)$ 数据进行反演,所得结果与钻孔资料的比较,如上表所示,推得层位深度误差 $<5\%$,结果是令人满意

的。

在新疆北部某铅锌矿的实测结果,与CSAMT法的结果做了对比,地质效果也是令人满意的。此外还在煤田试测过,也得到好的效果,限于篇幅,本文不能全面介绍了。

H型及KH型,是我国南方煤田及深部多金属矿田常见的地电断面类型,对这类断面用瞬变电磁法具有很强的探测能力,对这两类矿田的勘查很适用。

近区瞬变电磁测深法常用的几种工作装置中,以中心回线装置为最佳,它具有对地层的纵、横向分辨能力强,受旁侧影响小,受地质噪声干扰影响也小,接收线圈可以实现严格定向等优点。

S_r 参数相对于 ρ_r 参数所利用 $\varepsilon(t)$ 值的时间段提早了10多倍,利用大信号电平换算的 S_r 参数反演的可靠性要比 ρ_r 参数好。就这点来讲,我们使用的虽是中、小功率的仪器系统,仍可能用来探测较深的目标层。

参 考 文 献

- [1] 牛之璠等,《脉冲瞬变电磁法及应用》,1986,中南工业大学出版社,长沙。
- [2] 牛之璠,瞬变电磁测深曲线微分参数解释方法,中南工业大学学报,1991年(待刊)。

The Detectability of Intermediate Conductive Layers by Transient Electromagnetic Sounding

Niu Zhijian

The large in-loop survey is ideal for deep-seated geological body exploration by transient electromagnetic sounding. It has been demonstrated that the parameter S_r is more reliable and accurate than the parameter ρ_r for conductive layer delineation. Theoretical calculations and field examples show that the TEM sounding method has a great detectability of intermediate conductive layers as coal or metallic beds.