

瞬变电磁法原理及应用

傅茂朝

(中航勘察设计研究院 北京 100086)

0 前言

瞬变电磁法(或称时域电磁法,简称TEM),它利用不接地回线或接地导线进行强功率电脉冲激发,在脉冲的间歇期间,利用线圈或接地电极观测二次涡流场。TEM法早在50~60年代就在苏联广泛应用并已成为常规物探索方法。瞬变电磁法早就应用于金属矿勘探,煤田地质研究等领域,现在它的应用范围已扩大渗透到寻找地下水、地热以及工程勘察等诸多新领域。

1 TEM方法原理

1.1 激发场源

时域电磁法中,激发场源采用具有周期性的脉冲序列,如矩形、梯形、半正弦波、三角形波等。根据频谱分析,理论上脉冲波形可视为无数正弦或余弦波叠加而成,即脉冲波激发的二次场相当于频率域中相应谱波激发二次场的总和。也就是说,时域中一次测量就相当于频域中多次测量的结果。

实际观测方案中,为了有效地压制观测

系统中的直流偏移和噪声干扰,常采用周期及极性脉冲序列。现有仪器系统常见的有双极性矩形、半正弦、梯形等脉冲波形。

1.2 野外工作方法

瞬变电磁法有许多变种,施工布极方法也有很大差别。按TEM应用领域可将工作装置分为四类:(1)剖面测量装置;(2)测深装置;(3)井中装置;(4)航空装置。常用的是前两种。

剖面测量装置如图2所示。图(a)、(b)、(c)三种装置在进行剖面测量时,接收回线 R_x 与发送回线 T_x 相对位置不变而测线移动观测。大定源装置 T_x 的不动,使接收线圈沿测线移动观测。大定源和中心回线装置可进行 x 、 y 、 z 三个分量观测是其优点之一。

测深装置如图3所示。中心回线的接收线圈位于发射线圈中心,常用于目的层在1km以内的测深。其他三种主要是用于探测深部构造,偶极矩大致等于目标层深度。

对于电偶源和磁偶源装置,电脉冲激发

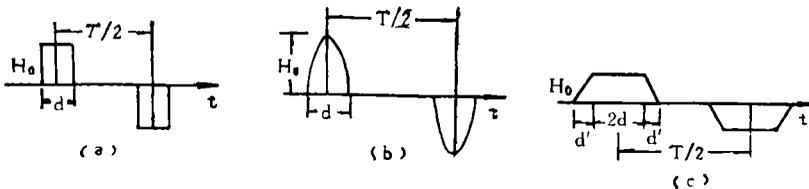


图1 几种常见的激励场波形

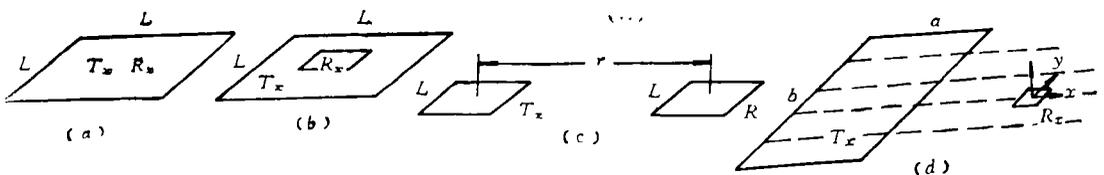


图2 TEM剖面测量装置

(a) 重叠(共圈)回线装置; (b) 中心回线装置; (c) 偶极装置; (d) 大定源装置

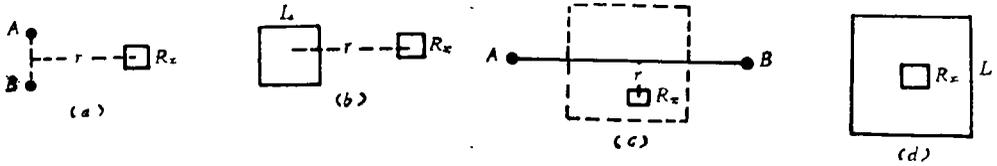


图 3 TEM测深装置

(a) 电偶源; (b) 磁偶源; (c) 线源; (d) 中心回线

和接收很类似于地震法中的放炮与检波。尽管瞬变电磁场与地震波场存在差别，但他们的相似之处却为瞬变电磁法引进成熟的地震数据采集、处理和解释方法提供了可能。

1.3 均匀半空间的瞬变场

在理论研究中，为了简化问题，通常只考虑单阶跃波激励，并忽略位移电流的影响，那么，对于任何时刻 t ，地下最大瞬变场的深度

$$\delta_{\tau D} = \sqrt{\frac{2\rho t}{\mu_0}} \quad (1)$$

它与频域中的趋肤深度类似。由此可以理解为目标体越浅，观测时间越提前。反之亦然。

先令扩散系数 $r = 2\pi\sqrt{\frac{2\rho t}{\mu_0}}$ ， τ 是观测点离磁偶源中心的距离。只在均匀半空间，且只在 $\tau/r \rightarrow 0$ (早期或称远区) 和 $\tau/r \rightarrow \infty$ (晚期或称近区) 极限条件下，各种装置才有简单的电压响应和磁场响应，从而有简单的视电阻率公式。常用的同点装置(共圈、重叠、中心回线) 晚期视电阻率公式可表示如下。

用电压响应计算：

$$\rho_{\tau} = \frac{\mu_0 t}{4\pi} \left(\frac{2\mu_0 M Q}{5t V_z} \right)^{2/3} \quad (2)$$

用磁场响应计算：

$$\rho_{\tau} = \frac{\mu_0^{5/3} M^{2/3}}{\pi t (30 B_z)^{2/3}} \quad (3)$$

式中 M ——发送磁矩； Q ——接收回线面积； B ——垂直磁场； V_z ——感应电压。

当 t 较大时， ρ_{τ} 曲线后支趋近于均匀大地真电阻率。而 t 较小时， ρ_{τ} 曲线前支“上翘”畸变，可以用数值计算的办办法校正。

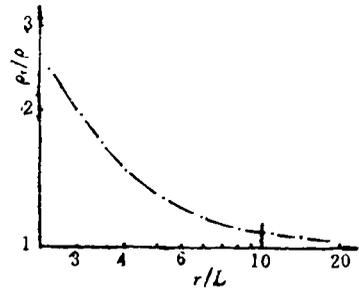


图 4 中心回线装置在均匀大地上的 ρ_{τ} 曲线

1.4 水平导电薄层上的瞬变电磁场

高阻介质中水平导电薄层的磁变电磁响应有简单的初等函数表达式。在垂直磁偶源下，水平导电薄层的电导 S_{τ} 与深度 H_{τ} 有精确表达式。

用电压计算：

$$S_{\tau} = \frac{16\pi^{1/3} V_z^{5/3}}{(3MQ)^{1/3} \mu_0^{4/3} (V_z)^{4/3}}$$

$$H_{\tau} = \frac{(3MQ)^{1/4}}{(16\pi V_z S_{\tau})^{1/4}} - \frac{t}{\mu_0 S_{\tau}} \quad (4)$$

用磁场参数计算：

$$S_{\tau} = \frac{3(16\pi)^{1/3} Q B_z^{4/3}}{M^{1/3} \mu_0^{4/3} V_z}$$

$$H_{\tau} = \frac{(\mu_0 M)^{1/3}}{(16\pi B_z)^{1/3}} - \frac{t}{\mu_0 S_{\tau}} \quad (5)$$

式中 S_{τ} ——视导电率； H_{τ} ——视深度； M ——发送磁矩； Q ——接收回线面积； B_z ——垂直磁场； V_z ——垂直电场；
上两式正是瞬变电磁法测深曲线微分分解法的理论根据。

1.5 TEM信号检测原理

由于计算机技术的引入，很方便地实现

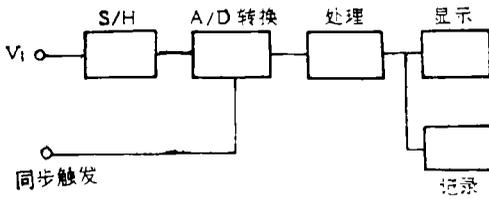


图 5 数字多点平均原理框图

由于TEM信号具有早期衰减快、晚期衰减慢的特征，且信号晚期常常淹没在噪声电平之中。因此，实际观测方案中，前期道的采样窗口窄，后期道的采样窗口宽，在每一窗口内密集采样，然后取平均值作该道采样值。

为了抑制低频噪声、风动噪声、上一个采样周期剩余信号以及更有效地抑制工业电的谱波干扰，常使用占空比为1:1的双极性方波，频率取工频50Hz的整数分之一倍。例如SD-1型瞬变电磁仪系统发送信号频率就有4档可选：超高频为225Hz，高频为25Hz，中频为6.25Hz，低频为2.5Hz。实际工作中应根据探测目标体的电性差异、规模、埋深等情况综合考虑选取发送频率。

2 观测参数及数据处理

2.1 诸多的仪器系统采集的原始数据有所不同，大致分三类

(1)用感应电压与发送脉冲电流归一化参数，即仪器读数为 $V(t)/I$ ，以 $\mu V/A$ 为单位。如SD-1等系统。

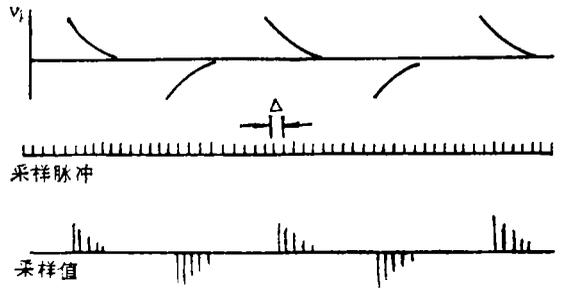
(2)以感应电压与一次场感应电压的比值为参数，即仪器读数为 $\frac{V(t)}{V_1} \times 100\%$ 。如

PEM系统。 V_1 ——一次场。

(3)归一到某个放大倍数，如EM-37、EM-47、EM-57系列。仪器读数为

$$M = V(t) \cdot G \cdot 2^N$$

了数字多点平均，信噪比 $SNIR = \sqrt{N}$ ， N 是简单叠加次数。数字多点平均原理框图如下：



$V(t)$ ——接收线圈电压； G ——前置放大器放大倍数； 2^N ——仪器公用通道放大倍数。

2.2 仪器观测值最后都要求换算成：

(1)瞬变值 $\frac{dB}{dt}$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{V(t)}{Sr \cdot N} \tag{6}$$

$V(t)$ ——接收图感线应电压

Sr ——接收线圈面积

N ——接收回线匝数

(2)磁场值 $B(t)$

$$\begin{aligned} B(t) &= N \cdot Sr \int_0^{\infty} V(t) dt \tag{7} \\ &= N \cdot Sr \cdot 0.5 \cdot \sum_{j=1}^N [V(t_j) \\ &\quad + V(t_{j+1})] \cdot [t_{j+1} - t_j] \end{aligned}$$

$V(t)$ ——接收线圈感应电压

Sr ——接收线圈面积 N ——采样道数

2.3 定性分析

将处理后的资料形成 $\rho_r - t$ 曲线， $S_r - t$ 曲线， $\rho_r - S_r$ 拟断面等值线图，分析测区基本地电特征。

2.4 半定量解释：

对比已知钻孔资料的 $\rho_r - t$ 曲线， $S_r - t$ 曲线，得到目标体的特征响应，从而推断出未知区的地电特征分布。

在用式(5)或(6)计算而来的 $S_r - H$ 曲线合乎常理时，可对比已知钻孔资料，分层或发现目标体效果明显。

2.5 定量解释:

目前的技术水平,可进行一维正反演,自动拟合实测曲线。

3 工程实例

3.1 工程概况

杭州留下互通式立交桥是杭州市绕城公路祥符桥至留下段的主桥。桥址地基在水田中,表层是耕植土,中间层是粘土、砂砾土,基岩是高阻灰岩。桥基设计采用钻孔嵌岩灌注桩。在进行33L1号桩位钻孔时,还未钻至设计深度就遇到溶洞,造成突然坍塌,形成一个5m×5m×3m的大坑,致使钻机掉进大坑,无法继续施工。

为此投入瞬变电磁法,以期查清其他桩基下的基岩中是否存在溶洞。测区共布置剖面6条,各长100m,点距5m。采用中心回线工作装置,发射回线用2匝20m×20m方框,接收回线用4匝10m×10m方框。仪器是中南工业大学研制的SD-1型智能瞬变电磁仪。

3.2 资料处理与解释

处理成果见图6、图7。在图6的第五道感应电压平面等值线图上,33L1号桩基处附近等值线值大且密集,说明该位置下有大的低阻体存在,这与造成塌孔的溶洞存在相吻合。图6上的35R2号桩基处类似,且在35号桥墩5个桩的感应电压拟断面图上,等值线直观地显示了在35R2位置下等值线下凹,因此断定35R2位置下基岩中存在溶洞。推而广之,34R1处基岩中也存在溶洞。由此得出结论,34R1、35R2两处桩基施工必须修改原设

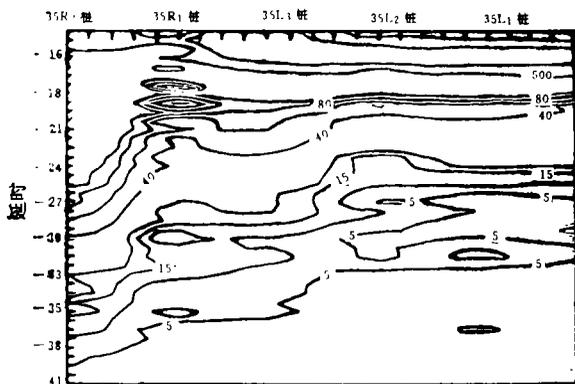


图7 35号桥墩剖面感应电压拟断面图

计方案。32R2、32R1、32L、2L2、35L3处应是基岩破碎发育地段,也必须加以处理。

4 结束语

瞬变电磁法(TEM)与频域电磁法相比,实质相同,且由傅里叶变换联系着,但由于噪声源方面的重要区别,TFM法相对地有更多的优点。

(1)瞬变电磁法(TEM)在一次场不存在时观测二次场,自动消除了频域法中一次场存在时测量的耦合噪声,加大激励场源磁矩和叠加采样次数,可以有效的提高信噪比。

(2)TFM法只测量磁场分量,因而受地表电性不均匀影响小,静态效应微弱。

(3)TEM法有较高的垂向分辨率,较小的体积效应和足够的探测深度。

(4)可采用零偏移距工作装置,使激发与接收出于最佳耦和状态。

(5)TEM法测量工效高,剖面测量兼有测深效果,这是直流测深法不可比拟的。

(6)TEM法理论复杂,仪器性能要求高,在工程勘察领域应用研究亟待加强。

参 考 文 献

- 1 牛之琏,时间域电磁法原理.中南工业大学出版社,1992
- 2 杭州市绕城公路留下互通式立交桥瞬变电磁成果报告.电力工业部华东勘测院物探队.1995

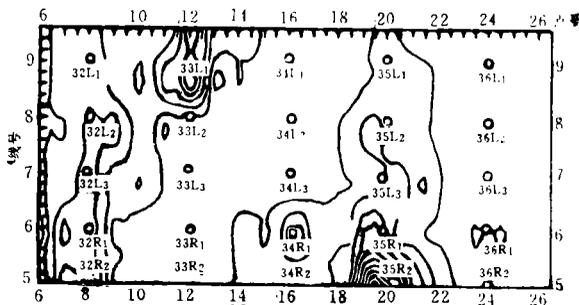


图6 第五道感应电压平面等值线图