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

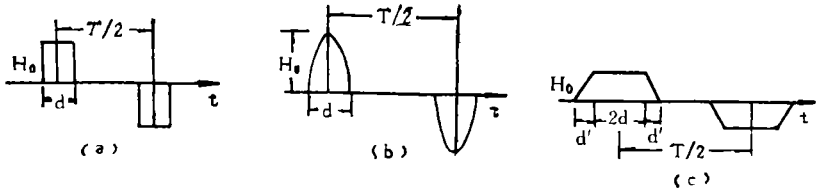


图 1　几种常见的激励场波形

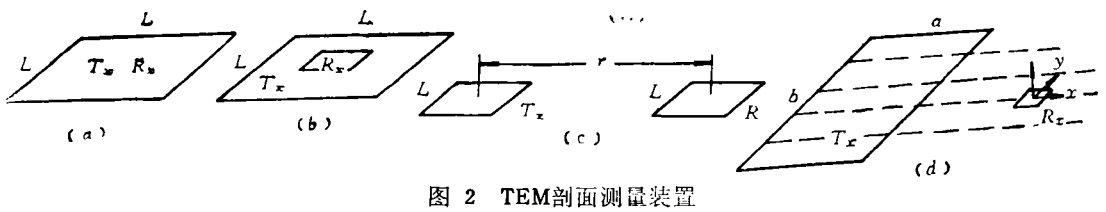


图 2　TEM剖面测量装置

(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

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

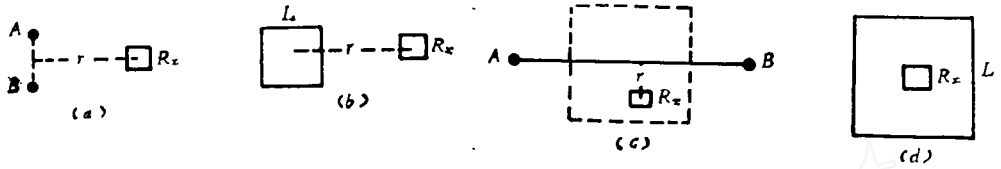


图 3 TEM测深装置

(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

$$\delta_{TD}=\sqrt{\frac{2\rho t}{\mu_0}} \qquad (1)$$

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$\tau=2\pi\sqrt{\frac{2\rho t}{\mu_0}}$，$\tau$是观测点离磁偶源中心的距离。只在均匀半空间，且只在$\tau/r\to 0$（早期或称远区）和$\tau/r\to\infty$（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：

$$\rho_\tau=\frac{\mu_0 t}{4\pi}\left(\frac{2\mu_0 MQ}{5tV_z}\right)^{2/3} \qquad (2)$$

用磁场响应计算：

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

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。

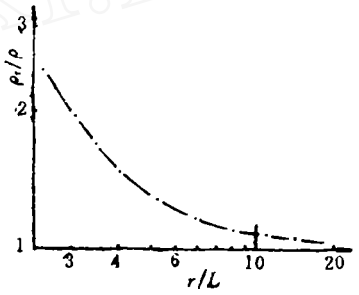


图 4 中心回线装置在均匀大地上的ρ_τ曲线

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：

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

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

用磁场参数计算：

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

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

式中 $S\tau$——视导电率；H_τ——视深度；

M——发送磁矩；Q——接收回线面积；

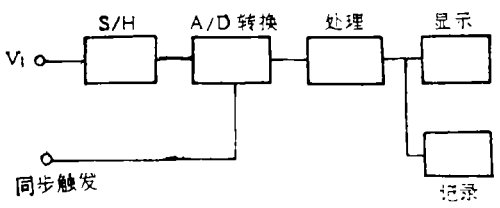
B_z——垂直磁场；V_z——垂直电场；

上两式正是瞬变电磁法测深曲线微分解法的理论根据。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.5　TEM信号检测原理

由于计算机计术的引入，很方便地实现了数字多点平均，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：



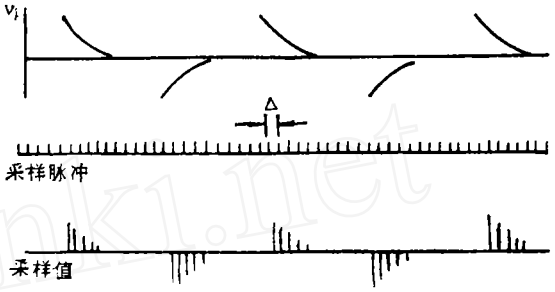


图 5　数字多点平均原理框图

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谐波干扰，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$\frac{V(t)}{V1}\times 100\%$。如PEM系统。$V1$——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

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

$V(t)$——接取线圈电压；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$B(t)$

$$B(t)=N\cdot Sr\int_0^{\infty}V(t)dt \tag{7}$$

$$=N\cdot Sr\cdot 0.5\cdot\sum_{j=1}^{N}[V(t_j)+V(t_{j+1})]\cdot[t_{j+1}-t_j]$$

$V(t)$——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ρ_s-t曲线，$S_\tau-t$曲线，ρ_s、S_τ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ρ_s-t曲线，$S_\tau-t$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$S_\tau-H$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。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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。

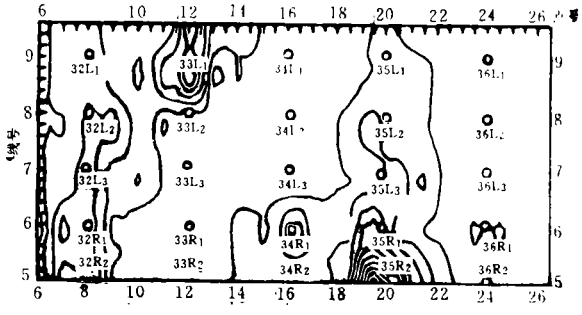


图 6 第五道感应电压平面等值线图

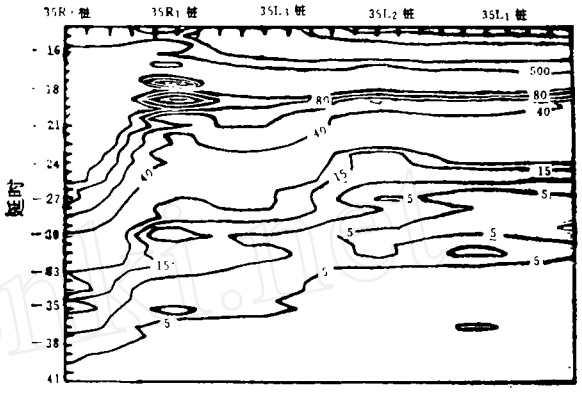


图 7 35号桥墩剖面感应电压拟段面图

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

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net