

# 瞬变电磁法对地下不同位置 多个三维薄板探测能力的研究

唐新功<sup>1,2</sup>, 胡文宝<sup>2</sup>, 严良俊<sup>2</sup>

(1. 北京大学 地球与空间科学学院理论与应用地球物理研究所 北京 100871 2. 中国石油天然气集团公司 物探重点实验室江汉石油学院研究室 湖北 荆州 434023)

摘 要: 以层状地层中多个位于不同位置 and 不同埋深的三维导电薄板为例, 对瞬变电磁(TEM)法分辨地下多个三维异常体的能力进行了详细的分析和讨论。模型计算的结果表明, 无论异常体与源的距离远近, TEM 法对近地表的多个异常体分辨能力总是很好。当多个异常体在垂直方向排列时, TEM 法对它们的探测能力最差; 当它们以不同埋深沿测线方向排列时, 埋深最浅和最近源的异常体最容易探测到; 当夹在中间的异常体规模较小、埋深较大时, 它的异常场容易被其它异常体所掩盖。总体上讲, 无论在源下方还是在接收器下方, TEM 法对水平方向多个异常体分辨能力优于垂向上的。

关键词: 三维模型; 正演; 瞬变电磁响应; 多个异常体; 埋深; 探测能力

中图分类号: P631.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2004)06-0528-04

随着高精度数字式野外测量仪器的使用, 微弱信号的检测已不是问题, 但解释技术的相对滞后成了限制人工源电磁勘探方法发展的主要因素。一维瞬变电磁法反演经过多年的发展, 已经比较成熟, 二维瞬变电磁法正反演技术也正在快速发展, 但是三维瞬变电磁法的正演问题还处于深入研究之中; 反演由于受正演问题和计算机条件的限制, 在目前更是不可能的问题。正演是反演的基础, 正演问题研究得越透彻, 反演问题越有根据。深入研究三维瞬变电磁法的正演问题, 是提高瞬变电磁法应用的前提。三维正演在电法勘探中具有重要的意义, 实际上, 地下构造都是以三维形态赋存于围岩介质中, 加上复杂的地形, 三维正演技术更显示出其重要性。考察 TEM 方法对层状地层中的三维异常体的分辨能力是三维瞬变电磁法正演问题研究的基础, 三维薄板是地层中三维异常体的简单而良好的近似, 文献[1, 2]中曾对层状地层中的三维异常体的瞬变电磁响应做了研究, 本文是它们的继续篇。

## 1 理论、算法及实现

层状地层中三维异常体中的总电场和总磁场满足如下的离散积分方程

$$E(r) = E_p(r) + \sum_{n=1}^N (\sigma_{an} - \sigma_j) \tilde{I}_l^E(r, r_n) E_a(r_n),$$

$$H(r) = H_p(r) + \sum_{n=1}^N (\sigma_{an} - \sigma_j) \tilde{I}_l^H(r, r_n) E_a(r_n),$$

式中  $\sigma_{an}$  和  $\sigma_j$  分别为异常体第  $n$  个小元素和第  $j$  层的电导率, 张量格林函数  $\tilde{I}_l^E$  和  $\tilde{I}_l^H$  分别与电场和磁场有关。将异常体总共划分为  $N$  个小元素, 每一小元素的电场值近似取其中心点的值。等号右边第一项为一次场, 或层状地层的场, 可以用快速汉克尔变换法计算; 第二项为异常体的散射场或二次场, 用格林函数法求解。

为了在计算中既考虑精度同时又兼顾速度, 在划分异常体时采用变步长法, 即在测线附近网格要细一些, 远离测线时可以粗一些; 在靠近地面处(埋深较浅时), 网格也要小一些, 在较深处则可以大一些。计算时, 根据实际情况需要, 长方体元素还可以进一步细分为若干立方体的小元素, 然后沿这些立方体小元素对张量格林函数进行积分。张量格林函数在长方型元素上的积分可以看成是立方体小元素积分的累加<sup>[3]</sup>。

一旦求出了频率域响应, 数字线性滤波法提供了一种由频率域向时间域转换的方法<sup>[4]</sup>。计算中, 我们用数字滤波法近似计算正弦和余弦变换来得到时间域的响应, 即

$$\frac{\partial H(t)}{\partial t} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \text{Im}[H(\omega)] \sin(\omega t) d\omega,$$

$$h(t) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{Im}[H(\omega)]}{\omega} \cos(\omega t) d\omega,$$

其中  $\text{Im}[H(\omega)]$  为电磁场分量的虚部。从理论研究和实际计算中我们发现,用电磁场的虚部分量比实部分量能获得更好的结果。

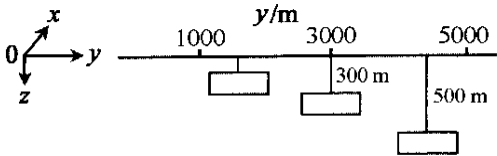
利用 Anderson 的滞后褶积快速数字滤波技术可以计算这些正弦和余弦变换。笔者在频率域中的计算共使用 51 个频点 0.01 ~ 1 000 Hz,跨 5 个数量级,每个数量级中取 10 个点,以保证足够的计算精度。向时间域转换时,计算了 0.001 ~ 10 s 共 4 个数量级(每个数量级中取 10 个点)的 41 个时间点的瞬态响应。

2 模型设计

模型模拟了 5 层层状地层中不同位置的 3 个三维薄板。薄板尺寸为(4 300 × 400 × 50) m<sup>3</sup>,电阻率为 1 Ω · m。设计了 4 种不同的情形(表 1)。图 1 中给出的是沿测线方向(接收器布设方向)排列的模型 1 的示意。

表 1 试验模型参数

序号	模型
1	顶面埋深 100、300、500 m $y=1500、3000$ 和 4500 m(埋深递增)
2	顶面埋深 500、300、100 m $y=1500、3000$ 和 4500 m(埋深递减)
3	顶面埋深 100、300、500 m,垂直位于源下方
4	顶面埋深 100、300、500 m,垂直位于 $y=3\,000$ m 的接收器下方



$h_1, \rho_1$	3000m, 50 Ω·m
$h_2, \rho_2$	100m, 500 Ω·m
$h_3, \rho_3$	100m, 10 Ω·m
$h_4, \rho_4$	1800m, 50 Ω·m
$\rho_5$	500 Ω·m

图 1 层状地层中的三维薄板模型示意  
模型设计中,采用笛卡尔右手坐标系  $z$  轴垂直

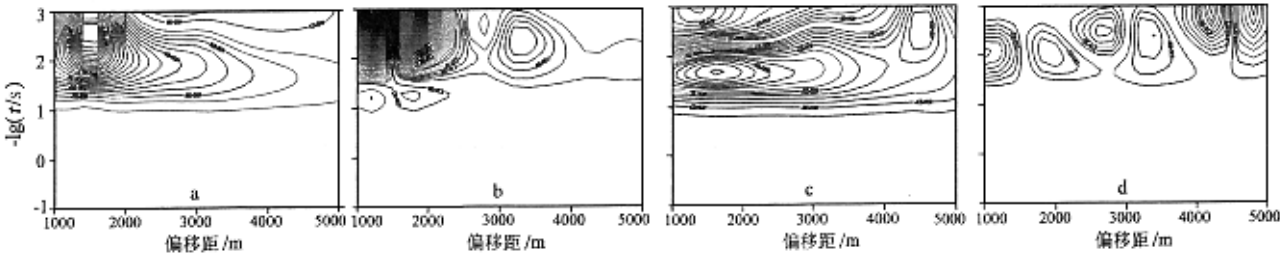


图 2 模型 1、2 的二次场瞬态响应等值线

万方数据 a—模型 1 的  $e_x$  等值线 b—模型 1 的  $V_z$  等值线 c—模型 2 的  $e_x$  等值线 d—模型 2 的  $V_z$  等值线

向下  $x$  方向为走向方向。用沿  $x$  方向的接地水平电偶极子激发,电偶极矩为 200 A · m,定义源的坐标为  $y = -2\,000$  m,用 21 个沿  $y$  方向以等间距 200 m 排列的接收器接收感应信号,偏移距 3000 ~ 7 000 m。这里只讨论  $e_x$  分量和垂直磁场的时导数  $\partial h_z / \partial t$  (或  $V_z$ ) 分量的二次场瞬态响应曲线。

3 结果分析

图 2 为模型 1 和模型 2 的  $e_x$  分量和  $V_z$  分量的二次场瞬态响应曲线。从图 2a、b 中可以看出,当埋深逐渐加大时,TEM 法对薄板的分辨能力依次降低,但对近源的异常体反映非常灵敏,可以分辨出模型中间异常体的存在,进一步计算表明,当埋深继续增大时,远源的和埋深大的异常体就不容易分辨了,但是对近源的异常体依旧反应灵敏。

当 3 个薄板随偏移距埋深逐渐减小时(图 2c、d),可以从电磁场曲线上,尤其是磁场曲线上明显地分辨出 3 个异常体的存在:第一个由于最靠近发射源,它的异常场相当明显,最远处的异常体由于埋深较浅,异常场也比较明显,相对而言,中间异常体的异常场比较小。进一步加大异常体在垂直方向的间距时,深处异常体的异常场变得更加平缓,TEM 对夹在中间的异常体的分辨能力也逐渐下降,但是近源的和近地表的仍可清晰分辨。

图 3 为 3 个薄板垂直位于源下和接收器下的  $e_x$  分量和  $V_z$  分量的二次场瞬态响应曲线。从图 3a、b 中可以看出,当多个异常体在发射源下方垂直排列时,异常体(尤其是近源的)引起的异常场非常大,并且异常场随时间和距离的增加衰减很缓慢。如果最上面的异常体埋深不是太浅(越浅,距离源越近,引起的异常就越大),埋深较大的异常体可以显示出来,但是如果最浅部的异常体距离源特别近,那么总体的异常与源下方 1 个异常体的异常场在形态上相似<sup>[2]</sup>,使得下面的异常体的贡献被淹没。例如,计算表明,源下方埋深为 10 m 和 1 000 m 的 2 个薄

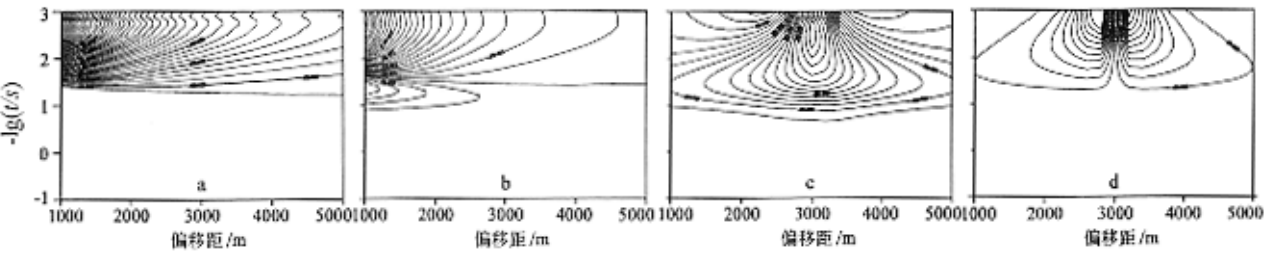


图3 模型3、4的二次场瞬态响应曲等值线

a—模型3的 $e_x$ 等值线 b—模型3的 $V_z$ 等值线 c—模型4的 $e_x$ 等值线 d—模型4的 $V_z$ 等值线

板的瞬态响应与埋深为100 m和1 000 m的2个薄板的电磁响应就有明显不同,前者更趋近于近地表的1个异常体的响应,后者由于上面异常体的埋深不是太浅,2个异常体的响应都能够反映出来;另外计算还表明,源下方埋深为100、1 000 m的2个薄板和100、500、2 000 m的3个薄板的异常场在形态上非常相似,难以区分出下面具体有多少个异常体。这说明在这种情况下,TEM法对探测异常体个数的能力比较弱。

当多个异常体在接收器下方垂直分布时(图3c、d),异常场主要集中在异常体附近(加大深度时一样),这时,TEM法对异常体个数的探测能力同样也比较弱。与文献[1]的比较可知,TEM法对多个异常体的分辨能力在水平方向上要优于垂向方向上。

表2为以上讨论的模型的计算结果归总,其中对应于每个模型的第二行是在第一行的基础上仅改变了多个薄板的埋藏深度,以进一步考察TEM对它们的探测能力。

表2 TEM法对模型探测能力的比较

序号	模型	埋藏深度/m	分辨能力
1	3个薄板深度递增	100、300、500	好
		100、500、1000	较好
2	3个薄板深度递减	500、300、100	好
		1000、500、100	好
3	源下垂直方向3个薄板	100、300、500	较差
		100、500、2000	较差
4	接收器下垂直方向3个薄板	100、300、500	较差
		100、1000、2000	较差
5	文献[1]的结果	100、100、100	好
		1000、1000、1000	较好

4 结论

通过对水平地层中位于不同位置的多个导电薄板的瞬变电磁场响应的大量计算和分析,得出了以下一些有意义的结论。

(1)当多个异常体随着远离发射源、埋深越来越浅时,最容易被探测到,但这时仍然以近源的异常

体和近地表的异常体最容易分辨,夹在之间的异常体,如果其尺寸太小,或者埋深太大,它引起的电磁响应容易被其它异常体所掩盖而不容易被探测到。

(2)当多个异常体沿测线方向埋深越来越大时,远处的异常体常被淹没而不容易探测到。

(3)当多个异常体在发射源下方垂直排列时,异常体引起的异常场非常大,并且异常场随时间和距离的增加衰减很缓慢。当最浅部的异常体特别浅时,整体的异常主要反映浅部异常体的信息,下面的异常体不易探测到;只要浅部的异常体不太浅,下面的异常体有可能探测到,但是却无法分辨出有多少个,说明这种情况下TEM法对探测异常体个数的能力比较弱。

(4)当多个异常体在接收器下方垂直分布时,异常场主要仅仅集中在浅部异常体附近,这时,TEM法对异常体个数的探测能力同样也比较弱。

(5)同等条件下,异常体埋深越深,电磁法对其分辨率能力也越低。不论异常体与发射源的距离远近,TEM法对近源和近地表的异常体的分辨能力总是比较高的。

(6)总体上讲,TEM法对多个异常体的分辨能力在水平方向上要优于垂向上。

参考文献:

[1] 唐新功,胡文宝,严良俊.多个三维薄板瞬变电磁响应的比较[J].江汉石油学院学报,1999,21(4):57-61.  
[2] 唐新功,胡文宝,严良俊.层状地层中三维薄板的瞬变电磁响应[J].石油地球物理勘探,2000,35(5):628-633,650.  
[3] 米萨克,N纳比吉安.勘查地球物理电磁法(第一卷)[M].赵经祥,王艳君,译.北京:地质出版社,1992,302-351.  
[4] Anderson W L. Computation of Green's tensor integrals for three-dimensional electromagnetic problems using fast Hankel transforms[J]. Geophysics, 1984, 49(10):1754-1759.  
[5] Newman G A, Hohmann G W, Anderson W L. Transient electromagnetic response of a three-dimensional body in a layered earth[J]. Geophysics, 1986, 51(8):1608-1627.

STUDY OF THE DETECTABILITY TO MULIPLE THREE DIMENSIONAL THIN BODIES WITH DIFFERENT LOCATIONS BY TEM METHOD

TANG Xin-gong<sup>1 2</sup> ,HU Wen-bao<sup>2</sup> ,YAN liang-jun<sup>2</sup>

( 1. Institute of Theoretical and Applied Geophysics ,Peking University ,Beijing 100871 ,China 2. Department of Geophysics ,Jiangnan Petroleum University ,Jingzhou 434023 ,China )

**Abstract :** In this paper ,the detectability of the transient electromagnetic ( TEM ) method to multiple anomalous bodies with different locations and buried depths in the stratum was detailed discussed. The results of these models illustrate that the detectability of TEM to those bodies buried shallower is quite good no matter whatever their distance from the source ,which also gives a further theoretical basis to the idea that TEM method can be used in the shallow target exploration. The detectability is the poorest when the multiple thin bodies are arranged vertically. When those anomalous bodies which have different locations and depths are horizontally arranged along the measurement line ,those bodies with shallower depths and the one which is nearest to the source can be most easily detected by TEM method ,while the bodies between them are always neglected if their sizes are too small or depth are too large. In general ,the detectability of TEM to multiple bodies is much better to those arranged horizontally than those arranged vertically.

**Key words :** 3D models ;forward modeling ;transient electromagnetic responses ;multiple anomalous bodies ;buried depth ;detectability

作者简介 :唐新功( 1968 - ) 男 ,1992 年毕业于江汉石油学院 ,硕士 ,讲师 现在为北京大学地球物理系博士研究生 ,主要从事电磁法勘探和地球动力学方面的研究。

地震仪综合技术服务

· 定点地震仪技术升级、功能增强

此项内容为借用定点地震仪中故障率低的单元电路 ,将我们研制的浮点模块与之有机结合 ,构成操作方便、故障率低、性能价格比极高的浮点地震仪。该技术适用于所有定点地震仪( 进口 ES-1210 , 1225 ,... ;BISON-1580 ,... ;OYO-1500 ,... ;MARK II ;国产 DZQ12-1 等型号 )。

· 地震仪通道扩展

80 年代中期 ,地震仪一般为 12 道定点 ,工作效率低。做 CDP 覆盖时 ,叠加次数少 ,信噪比不能提得较高 ,且动态范围小。为解决这些问题 ,我们做了以下工作 :①将原定点地震仪升级为浮点 ;②扩展为 24 道。

· CSA24 道浮点地震仪

集多年改造地震仪经验 ,汲取了国内外地震仪特长 ,并将我们的创造溶入其中 ,构成了性能价格比

极高的 CSA24 道浮点地震仪。

· 进口地震仪维修

自 1997 年成立地震仪维修部以来 ,给用户直接、间接维修进口地震仪数台 ,为用户节约了大量时间和可观的维修费用 ,深受用户好评。

· 触发电路保护器

· 锤击开关

经我们改进的地震仪均能获得浅反射处理软件、瞬态瑞雷面波处理软件、地脉动测量、高密度高分辨率测量等不断升级的支持。

联系人 徐贵来 梅汝吾  
单位 核工业北京地质研究院  
地址、邮编 北京安外小关 ,100029  
E-mail :guilaixu@163bj.com  
手机 :13601272455  
电话 : ( 010 )64962690 ,64921115