

doi: 10.11720/wtyht.2015.2.24

陈卫营,薛国强.广域电磁法中垂直磁场分量的分析与应用[J].物探与化探,2015,39(2):358-361.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2.24

CHEN W Y, XUE G Q. The analysis and application of the vertical magnetic component in wide field electromagnetic method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2): 356-359. http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2.24

# 广域电磁法中垂直磁场分量的分析与应用

陈卫营,薛国强

(中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘 要:** 接地导线源产生的频率域垂直磁场具有对地层敏感、垂向分辨率高、高阻穿透能力强、随收发距增大信号衰减迅速的特点。在接地条件较差、地形起伏很大的区域,测量水平电场和水平磁场的传统 CSAMT 工作方式不易实现,而测量垂直磁场是一种有效的测深方式。笔者从广域电磁法的原理出发,首先对频域垂直磁场的特性进行了分析,然后利用迭代法求取适用于全场区的视电阻率;将这种测量垂直磁场的广域电磁法工作方式应用于某冻土层地区的金属矿探测,取得了很好的效果。

**关键词:** 广域电磁法;垂直磁场;分辨能力;收发距;视电阻率;冻土层

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2015)02-0358-04

传统 CSAMT 的工作方式是在远区(3~5 倍的趋肤深度)范围内测量一组正交的电、磁场,一般为水平电场  $E_x$  和水平磁场  $H_y$ ,然后求取卡尼亚视电阻率。通常采用标量的多道工作方式,在一次排列中,多个电道共用一个磁道,例如 GDP32 和 V8 的一个排列为 7 道,其中 6 个电道,1 个磁道,采取这种工作方式是因为电场分量对地层更为敏感,测量成本也更为低廉<sup>[1-3]</sup>。但是,在某些特殊情况下,也会只利用某一个分量。例如,由于  $H_y$  分量的抗干扰能力较差,在干扰较为严重的地区  $H_y$  的数据质量很差,若采用比值法求取视电阻率,结果的准确性将会大大降低,此时就可以仅利用水平电场分量来进行解释;而在地形影响复杂、静态效应严重的地区,利用对地形不敏感的水平磁场  $H_y$  则具有较大的优势。在这方面,陈明生<sup>[4]</sup>、汤井田<sup>[5]</sup>、邱卫忠<sup>[6]</sup>等做了相关研究工作。

随着广域电磁法的兴起,电磁场场区的概念变得模糊起来,在广域电磁法工作中,不需要电磁场必须满足远区场条件才能进行测量,这样大大扩展了观测范围,提高了工作效率。由于采取全场区测量,从 MT 引入的卡尼亚视电阻率定义方式也不再适用于广域电磁法,理论上电磁场的各个分量都包含介质的电阻率信息,只是不同分量对电阻率的敏感程

度以及随装置系数的变化规律不同,因此在广域电磁法工作中只需测量合适的某单一分量便可获取地质构造的信息<sup>[7]</sup>。一般情况下,水平电场  $E_x$  具有对地层分辨率高、电阻率易求取、经济高效等优点,是广域电磁法中最常利用的分量<sup>[8-9]</sup>。但是在接地条件很差的区域,如沙漠、冻土、基岩裸露区域,电场的准确测量非常困难,而测量磁场则不受接地条件的限制,在磁场各分量中,垂直磁场  $H_z$  对地层的灵敏性强,垂向分辨率高,高阻穿透能力强,是替代测量  $E_x$  的最佳选择。笔者首先对垂直磁场  $H_z$  的特性进行了分析,给出了利用迭代法求取视电阻率的方法,最后以某冻土层地区金属矿勘探的实例说明了垂直磁场的应用效果。

## 1 垂直磁场响应计算与特性分析

如图 1 所示,直角坐标系下,设层状大地的各层电阻率和厚度分别为  $\rho_n, h_n$ ,则位于坐标原点的电偶极子在地表  $(x, y)$  处产生的垂直磁场可以表示为<sup>[10]</sup>

$$H_z = \frac{Id_s}{4\pi} \frac{y}{r} \int_0^{\infty} (1 + \gamma_{TE}) \frac{\lambda^2}{\mu_0} J_1(\lambda r) dr, \quad (1)$$

式中,  $I$  为电流,  $ds$  为偶极子长度,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ , 为接收点到发射源的距离,  $\gamma_{TE}$  为 TE 模式下的反射系数,

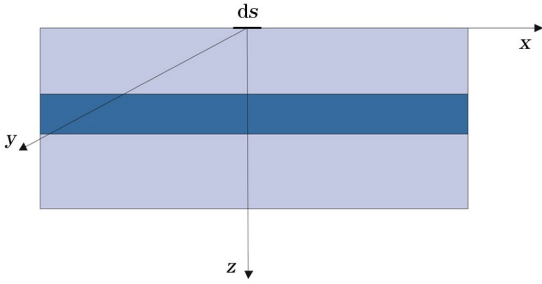


图 1 三层地电模型与坐标系统示意

$J_1(\lambda r)$  为一阶贝塞尔函数。对于接地长导线源,可以将其分割成许多段然后利用偶极子叠加理论进行计算,即

$$H_z = \frac{Iy}{4\pi} \sum_{n=1}^N \frac{\Delta x}{r_n} \int_0^\infty (1 + \gamma_{TE}) \frac{\lambda^2}{\mu_0} J_1(\lambda r_n) dr, \quad (2)$$

式中,  $r_n$  为接收点到每个偶极子的距离。

利用数字滤波技术便可以实现对上式的计算。当介质为均匀半空间时,  $H_z$  响应有解析表达式<sup>[11]</sup>:

$$H_z = - \frac{3Ids}{2\pi r^4 k_1^2} \sin\varphi \left[ 1 - \left( 1 + ik_1 r + \frac{1}{3} k_1^2 r^2 \right) e^{-ik_1 r} \right], \quad (3)$$

式中,  $\varphi$  为接收点与发射源之间的夹角,  $k_1$  为波数, 且  $k_1^2 = -i\omega\mu/\rho$ 。两种极限情况下,  $H_z$  的表达式分别可以简化:

$$\text{近区时} (|k_1 r| \ll 1), \quad H_z = \frac{Idl}{4\pi r^2} \sin\varphi;$$

$$\text{远区时} (|k_1 r| \gg 1), \quad H_z = - \frac{3Idl\rho}{2\pi r^4 i\omega\mu} \sin\varphi。$$

可以看出,近区时  $H_z$  与  $1/r^2$  成正比,但与介质的电阻率无关;远区时  $H_z$  与  $1/r^4$  成正比,与介质电阻率  $\rho$  成正比。为了详细说明  $H_z$  的响应特性,利用式(3)计算了3个收发距处的三层介质模型的垂直磁场响应,其中间层分别为高阻( $\rho_2 = 1\,000\,\Omega \cdot \text{m}$ )和低阻( $\rho_2 = 10\,\Omega \cdot \text{m}$ ),并利用

$$P_i = (|F_i^a - F_i^0| / F_i^0) \times 100\%$$

计算了它们与均匀半空间模型响应之间的相对误差,称之为相对异常(图2、图3)。式中,  $F_i^a$  代表三层模型产生的垂直磁场响应,  $F_i^0$  代表均匀半空间产生的垂直磁场响应,  $P_i$  值越大表示地层产生的相对异常越大。

图2显示,随着收发距的增大,垂直磁场强度的数量级显著减小,低阻中间层模型的垂直磁场产生的异常幅度更为明显。图3显示,随收发距增大,低阻模型的相对异常随之增大,收发距等于1、4、10 km时对应的相对异常的最大值分别为12.8%、55%和56%;可见收发距等于4、10 km时,低阻模型产生

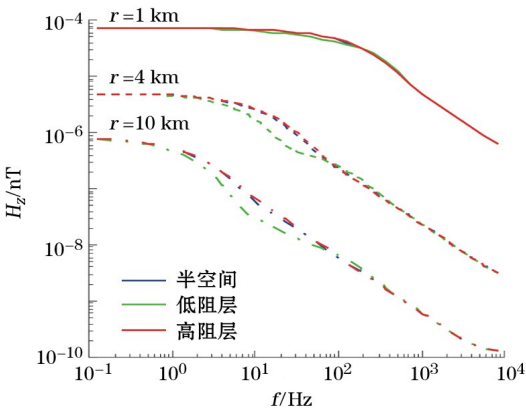


图 2 不同收发距处垂直磁场响应

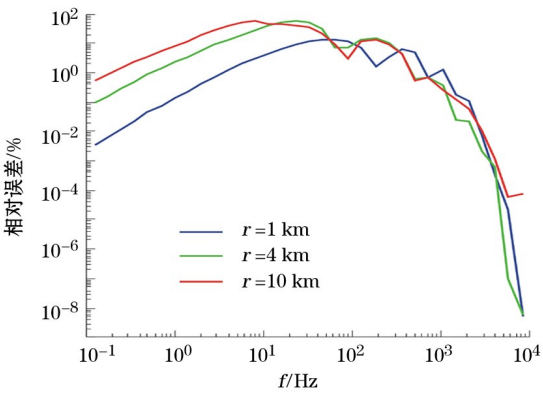


图 3 相对异常对比

的相对异常已非常接近,但是信号能量在高频段却相差了近两个数量级。因此,测量中在确保电磁场对地层分辨率没有显著下降的前提下,应尽可能地在小收发距范围内进行观测,以更好地增加信号强度、提高信噪比。

2 视电阻率计算

当收发距较小时,所有频点处的信号不能完全满足远区场条件,此时卡尼亚视电阻率定义方式不再适用。事实上,电磁场每个电磁场分量的表达式中都包含了介质的电阻率因素,利用合适的数学方法都能从中提取出介质的电阻率信息。常用的方法有迭代法和逆插值法,其中逆差值法的影响因素较少,计算过程稳定,但是不足之处是要求插值目标函数单调,而迭代法步骤简单,但是会存在迭代发散的情况<sup>[12-13]</sup>。笔者使用迭代法求取广域视电阻率,计算过程中并未出现不收敛的现象。

将式(3)改写成

$$H_z = - \frac{i3I\rho ds}{2\pi\omega\mu r^4} \sin\varphi F(ikr); \quad (4)$$

$$F(ikr) = 1 - [1 + ik_1 r + (1/3) \cdot k_1^2 r^2] e^{-ik_1 r},$$

$$K = 2\pi r^4 / (3\sin\phi ds)。$$

$F(ikr)$  为测量  $H_z$  的电磁效应函数,  $K$  是仅与观测装置尺寸有关的系数, 称为装置系数。则式(4)变为

$$|H_z| = \frac{I\rho}{K\omega\mu} |F(ikr)|, \tag{5}$$

因此, 视电阻率可以表示为

$$\rho_a = K \frac{\omega\mu |H_z|}{I |F(ikr)|}。 \tag{6}$$

需要注意的是,  $F(ikr)$  也是电阻率  $\rho$  的函数, 因此式(11)是个关于  $\rho$  的隐函数, 不能通过简单的数学方法求得  $\rho$  的解析表达式。求解式(6)的方法是计算机迭代法, 即给定一个初始电阻率值, 代入式(6)中, 进行多次叠加、逐次逼近, 最终得到满足一定误差范围内的解。

图4表示了收发距分别为4、10 km时, 由迭代法和卡尼亚法求得的视电阻率曲线。可以看出当频率较低不满足远区场条件时, 由卡尼亚法求得的视电阻率曲线会出现呈45°上升的渐近线, 使得无法分辨深部地层电性; 而由单分量求得的迭加视电阻率在所有频点内都较好地反应了地层的电性特征。

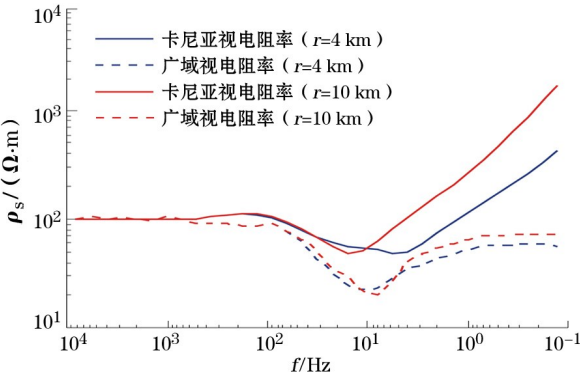


图4 广域电磁法视电阻率与卡尼亚视电阻率曲线

3 应用实例

工区位于河北省承德市隆化县, 位于冀北尚义—赤城—平泉金成矿带的东段, 是河北北部主要的金矿产地。为探测指定区域内金属矿的赋存位置、深度及规模, 共分两步进行了测量, 首先实施了磁法、大功率激电扫面工作, 然后根据初步成果在异常区域再进行测深测量。两步工作在时间上分隔较久, 第一步工作的时间为10月, 第二步在12月, 导致测深工作遇到了扫面工作未曾遇到的问题: 由于天气寒冷, 大地表层结冰, 厚度达1 m, 冻土层致使大地变硬且电阻显著增大, 对于发射源来说, 尚可通过深挖穿透冻土层铺设极板, 一次性布置好, 但是对于测量部分, 每次挖穿冻土层再布置接收电极十分

耗时、耗力, 导致本来计划的CSAMT工作难以实施。为此, 采用测量垂直磁场来完成测深工作, 工作参数设定为发射源长度800 m, 发送电流10 A, 频率范围8~8 192 Hz, 收发距3 km。

图5~图7为此次的探测成果。从图5的实测曲线可以看出,  $H_z$  信号强度虽然较弱, 但是数据质量非常好, 这是因为工区内几乎不存在明显的人文干扰; 从响应曲线的衰减形态可以看出, 250点和300点处的地层电性与前面3个点有所不同。图6

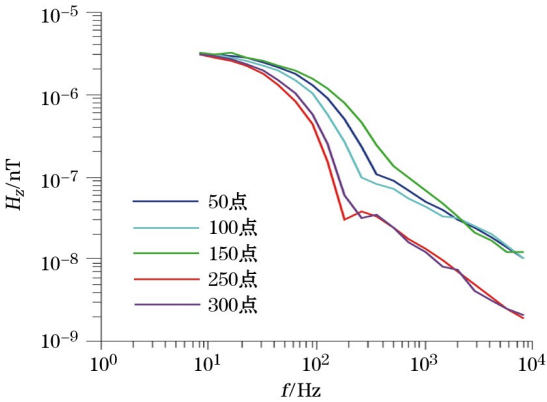


图5 实测  $H_z$  响应曲线

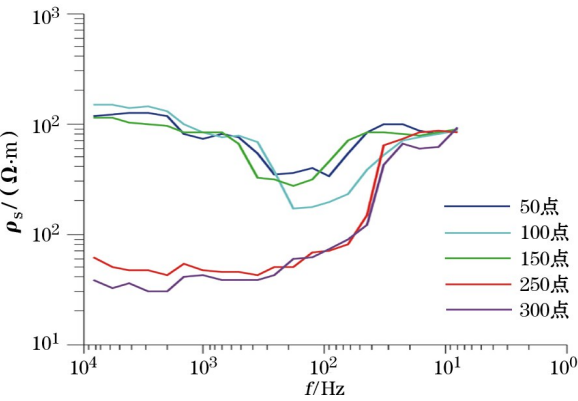


图6 测区视电阻率曲线

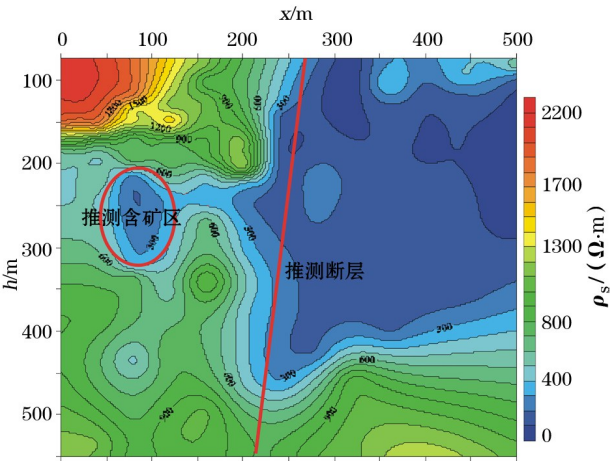


图7 测区视电阻率断面



中的视电阻率曲线也说明了这种电性变化的不同。图 7 显示,以 200 点为界,两边地层的电性存在明显差异,小号点方向在深度 150 m 之上存在明显的高阻层,200 m 左右出现一个低阻层,300 m 以下为高阻基底,地层电性为典型的 D 型结构。而大号点方向,地层电性为 G 型结构,即以深度 400 m 左右为分界面,上层为低阻,下层为高阻。根据已知地质资料,推测 200 点附近存在一条断层,50 点和 100 点之间的低阻区域推测为含金属矿体。

随后,矿方在 100 点附近实施了钻探工作,进尺 183 m 出现矿化岩石,很好地验证了解释结果。

4 结论

广域电磁法中,相对于其他电磁场分量,垂直磁场具有易测量、对地层敏感、垂向分辨率高的优点,但是也具有随收发距增大信号衰减迅速的缺点。通过对比三层大地模型在 3 个收发距处的垂直磁场响应,发现 10 km 处的信号响应强度比 4 km 处的下降了近 2 个数量级,但是对地层的敏感能力却相差不大。因此,可以适当减小收发距,在保证对地层具有一定分辨能力的前提下,尽量增大信号的强度。

由于采用广域电磁法的测量理念,卡尼亚视电阻率定义方式不再适用,利用迭代拟合法求得的全域视电阻率能更准确地反映地层的电性变化。实例中,由于测量区域存在厚达 1 m 的冻土层,接地条件太差,水平电场无法测量,故采用观测垂直磁场的方式替代。为了保证信号强度,提高信噪比,收发距定为 3 km,并利用迭代法求取了视电阻率。通过测量,圈定了矿体、断层位置,后续的钻探工作验证了

解释成果的可靠性。理论和实践证明,广域电磁法中测量垂直磁场可以有效地解决接地条件差区域的测深问题,并且在纵向分辨率上有较大优势。

参考文献:

[1] 何继善.可控源音频大地电磁法[M].长沙:中南大学出版社,1990.

[2] 底青云,王若.CSAMT 数据正反演及方法应用[M].北京:科学出版社,2007.

[3] 王顺国,熊彬,戴世坤.据一维正反演分析广域电磁法  $E-E_x$  方式的分辨能力[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(9):3766-3775.

[4] 陈明生,闫述,陶冬琴.电偶源频率电磁测深中的  $E_x$  分量[J].煤田地质与勘探,1998,26(26):60-66.

[5] 汤井田,周聪,张林成.CSAMT 电场  $y$  方向视电阻率的定义及研究[J].吉林大学学报:地球科学版,2011,41(2):552-557.

[6] 邱卫忠,闫述,薛国强,等.CSAMT 的各分量在山地精细勘探中的作用[J].地球物理学进展,2011,26(2):664-668.

[7] 何继善.广域电磁法和伪随机信号电法[M].北京:高等教育出版社,2010.

[8] 王启,王宏宇,程党性.广域视电阻率对比与应用[J].物探与化探,2014,38(1):120-124.

[9] 朱裕振,许聪悦.广域电磁法深部找矿试验效果[J].物探与化探,2011,25(6):743-746.

[10] 米萨克 N 纳比吉安.勘查地球物理电磁法一卷[M].赵经祥,王艳君 译.北京:地质出版社,1992:221.

[11] 方文藻,李予国,李貅.瞬变电磁法测深原理[M].西安:西北工业大学出版社,1993:30.

[12] 汤井田,何继善.水平电偶源频率测深中全期视电阻率定义的新方法[J].地球物理学报,1994,37(4):543-552.

[13] 王顺国,熊彬.广域视电阻率的数值计算方法[J].物探化探计算技术,2012,34(4):380-384.

The analysis and application of the vertical magnetic component  
in wide field electromagnetic method

CHEN Wei-Ying, XUE Guo-Qiang

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The vertical magnetic component caused by a grounded wire source is sensitive to the earth and decays sharply with the increase of transmitting-receiving distance. It is very difficult to conduct the conventional CSAMT method which measures horizontal electric and magnetic components when the earth is hardly conductive or the topography is very steep. Measuring the vertical magnetism is an effective alternative. Based on the theory of wide field electromagnetic method, the authors analyzed the characteristics of vertical magnetic component and obtained full-zone apparent resistivity by using the method of iteration. This survey mode was applied to mineral deposit detection in a frozen ground area, with good result achieved.

**Key words:** wide field electromagnetic method; vertical magnetic component; resolution; transmitting-receiving distance; full-zone apparent resistivity; frozen soil layer

作者简介: 陈卫营 (1987-), 男, 博士, 从事瞬变电磁法理论与应用研究。Email: chenweiying1987@163.com