doi:10.11720/wtyht.2015.2.23

赵越,王祎鹏,李貅.大定源回线 TEM 地空系统全域视电阻率定义[J].物探与化探,2015,39(2):352-357.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2. 23

Zhao Y, Wang Y P, Li X.The Definition of Full-domain Apparent Resistivity Based on Air-ground Transient Electromagnetic Data [J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2):352-357.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2.23

大定源回线 TEM 地空系统全域视电阻率定义

赵越1,王祎鹏1,2,李貅1

(1.长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054;2.中航勘察设计研究院有限公司,北京 100098)

摘要:介绍了一种快速有效的瞬变电磁地空系统全域视电阻率定义方法。利用磁场垂直分量与水平分量的时间 域响应定义地空系统全域视电阻率,实现全空间、全时域视电阻率定义。通过深入分析均匀半空间中地空系统的 电磁场表达式,发现地空系统的时间域磁场响应可以用与地面类似的多项式表示,利用视电阻率平移算法,实现全 域视电阻率定义。理论模型计算表明,该算法无需迭代,速度快且精度高。最后,对比分析了磁场强度法与感应电 动势法定义视电阻率对于异常体的分辨能力。

关键词:瞬变电磁地空系统;视电阻率;多分量;全域

中图分类号: P631.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2015)02-0352-06

瞬变电磁地空系统是将电性或磁性发射源放置 在地表,利用无人机或无人飞艇携带探头在空中进 行信号采集,采用全域、高密度、扫面式的三维测量 的装置。瞬变电磁地空系统结合了航空电磁法工作 效率高和地面电磁法采集信号信噪比高的优点,工 作成本低,操作安全且工作方式灵活多变,是一种极 具潜力的电法勘探新方法,特别适合在山区、无人 区、沼泽等地区进行详细的地质调查工作。

瞬变电磁地空系统这种工作方式的原型最早由 Misac N. Nabighia^[1]提出,接着在日本与加拿大不断 发展。20世纪90年代,具有代表性的有 FLAIRTEM 系统和 TerraAir 系统^[2-4],之后 R.S.Smith^[5]在对地 空系统、地面 TEM 及航空 TEM 进行对比之后,发现 对于深部目标体的探测,地空系统优于航空 TEM 系 统。对于电法勘探而言,视电阻率参数仍然是目前 广泛应用的参数,通过引入适当的视电阻率定义可 以使视电阻率响应曲线能够很好地反映出地下电性 界面参数的变化情况。目前,对于全区视电阻率定 义问题,已有许多学者做了大量的相关研究工 作^[6-9],但大多是基于中心回线单分量进行研究,对 于非中心点多分量视电阻率定义问题鲜有研究。事 实上,研究非中心点处多分量视电阻率定义问题是 非常有意义的,尤其是对于地空系统,其工作方式通 常是进行扫面测量,即测量的是全空间内的电磁响 应数据,为了既保证工作效率,又能全面利用采集数 据,有必要对全时域、全空间内的视电阻率进行定 义。由此,笔者针对一维均匀层状介质进行正演,分 析大定源地空系统非中心点处垂直分量与水平分量 磁场强度的曲线变化规律,并以此为基础,提出了一 种基于平移算法的地空系统全域(即全空间,全时 域)视电阻率定义方法。

1 时间域正演响应计算

以大定源装置为例(图1),Rx、Tx 分别为接收 回线与发送回线,r 为偏移距,接收高度为 Z。通过 推导得到均匀半空间大定源地空系统频率域电磁场 表达式:

$$\begin{split} E_{\varphi} &= -\mathrm{i}\omega\mu \,\frac{\partial F}{\partial r} = \mathrm{i}\omega\mu I_0 a \int_0^{\infty} \left[\frac{\lambda}{\lambda + u_1} \mathrm{e}^{\lambda z}\right] \mathrm{J}_1(\lambda a) \mathrm{J}_0(\lambda r) \mathrm{d}\,,\\ H_r &= \frac{\partial^2 F}{\partial r \partial z} = I_0 a \int_0^{\infty} \left[\frac{u_1 \lambda}{\lambda + u_1} \mathrm{e}^{\lambda z}\right] \mathrm{J}_1(\lambda a) \mathrm{J}_1(\lambda r) \mathrm{d}\lambda\,, \end{split}$$

收稿日期:2014-01-16



图1 地空系统模型装置示意

$$H_{z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial F}{\partial r} \right) = I_{0} a \int_{0}^{\infty} \left[\frac{\lambda^{2}}{\lambda + u_{1}} e^{\lambda z} \right] \cdot J_{1}(\lambda a) J_{0}(\lambda r) d\lambda, \qquad (1)$$

式中: E_{φ} 为电场强度; H_r 、 H_z 分别为磁场强度的水平 分量与垂直分量; I_0 为供电电流强度;a为圆形发射 回线半径,若发射回线是边长为L的方形回线时,可 通过两者面积相等来计算其等效半径($a = L/\sqrt{\pi}$);r为偏移距; u_1 为瞬变电磁场参数, $u_1 = \sqrt{\lambda^2 + k_1^2}$, $k_1^2 =$ $i\omega\sigma\mu_0$; σ 为均匀半空间电导率; μ_0 为真空磁导率。

从以上公式中可以看出,在非中心点处地空系 统的电磁场响应均为双重贝塞尔函数的积分,由于 该函数的强振荡与慢衰减特性难以应用通常的数值 积分算法进行计算,笔者采用贝塞尔函数展开法对 其进行计算。这种方法不仅精度高^[10],并且速度 快:将含有双重贝塞尔函数的积分式子中的一个贝 塞尔函数写进核函数,则剩下的式子用线性数字滤 波法进行计算。令

$$F_r = \frac{u_1 \lambda}{\lambda + u_1} e^{\lambda z} J_1(\lambda r) , \quad F_z = \frac{\lambda^2}{\lambda + u_1} e^{\lambda z} J_0(\lambda r) ,$$

 $H_r = -I_0 a \int_0^\infty F_r J_1(\lambda a) \, \mathrm{d}\lambda ,$

则有

$$H_{z} = I_{0}a \int_{0}^{\infty} F_{z} J_{1}(\lambda a) \,\mathrm{d}\lambda \quad (3)$$

(2)

频率域磁场和时间域磁场的对应关系为[11]:

$$\begin{cases} H(t) = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\infty} \frac{\mathrm{Im}H(\omega)}{\omega} \cos(\omega t) \,\mathrm{d}\omega \\ H(t) = H_{0} - \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\infty} \frac{\mathrm{Re}H(\omega)}{\omega} \sin(\omega t) \,\mathrm{d}\omega \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial H_{z}(t)}{\partial t} = -\frac{2}{\pi} \int_{0}^{\infty} \mathrm{Im}H_{z}(\omega) \cdot \sin(\omega t) \,\mathrm{d}\omega \\ \frac{\partial H_{z}(t)}{\partial t} = -\frac{2}{\pi} \int_{0}^{\infty} \mathrm{Re}H_{z}(\omega) \cdot \cos(\omega t) \,\mathrm{d}\omega \end{cases}$$

$$(4)$$

对于时间域磁场的求取,根据频谱分析理论,先

在频率域中求解给定场源的电磁场,然后通过傅氏 反变换得到相应的时间域电磁场。

2 时间域电磁响应的平移性质

对于地面装置,当在回线源中心点处接收时,磁 场垂直分量的时间域响应解析式为^[12]

$$B_{z}(t) = \frac{I_{0}\mu_{0}}{2a}f(u) = \frac{I_{0}\mu_{0}}{2a} \left[\left(1 - \frac{3}{u^{2}}\right)\Phi(u) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{3}{u}e^{\frac{-u^{2}}{2}} \right],$$
(5)
$$\Phi(u) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{0}^{u(t)} e^{-t^{2}/2} dt; \ u = a\sqrt{\frac{\mu_{0}}{2\rho t}},$$

$$f(u) = \left(1 - \frac{3}{u^{2}}\right)\Phi(u) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{3}{u}e^{-u^{2}/2} \circ$$

 $\Phi(u)$ 称为概率积分,f(u)为 B_z 的核函数,又称为归 一化响应函数。

可以将地表非中心点处电磁场的垂直分量和水 平分量用与中心点处垂直分量相似的多项式来表示^[13]。从式(1)中可以看出,与地面装置响应表达 式不同的是地空系统电磁响应的表达式中多了一个 e 的指数项 e^{Az},相当于多了一个系数项(当接收高 度与偏移距确定时,指数项相当于一个常数)。同 理,可以将地空系统非中心点垂直分量与水平分量 用于中心点垂直分量相似的多项式

$$B_{p}(t) = \frac{I_{0}\mu_{0}}{2a} \left[\left(c_{p1} - c_{p2} \frac{1}{u^{2}} \right) \Phi(u) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(c_{p3} \frac{1}{u} \right) e^{-u^{2}/2} \right]$$
(6)

来表示,式中的 c_{p1} 、 c_{p2} 、 c_{p3} 为未知系数(系数的选取 与接收高度和偏移距有关);p=z和p=r分别对应 于磁场的垂直分量和水平分量。为了进一步讨论方 便,将式(2)改写成以下形式

$$B_p(t)(\sigma,a,t) = \frac{I_0\mu_0}{2a}f_p(u) \circ$$

王华军^[9]指出均匀半空间的瞬变响应曲线具 有平移伸缩的特性,提出了一种半空间全区视电阻 率的直接解法,该方法速度快,精度高。以此为出发 点,讨论该方法在地空系统全域视电阻率计算中的 适用性。

令
$$\sigma^* = K\sigma, t^* = Kt$$
, K 为常数, 则有
 $u^* = a \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma^*}{2t^*}} = a \sqrt{\frac{\mu_0 K\sigma}{2Kt^*}} = a \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma}{t}} = u$,
 $B_p(t) (\sigma^*, a, t^*) = \frac{I_0 \mu_0}{2a} f_p(u^*) = \frac{I_0 \mu_0}{2a} f_p(u) = B_p(t) (\sigma, a, t)$,

上式可改写成

 $B_{n}(t)(K\sigma, a, Kt) = B_{n}(t)(\sigma, a, t)$

由此可知,在观测装置、接收高度、偏移距不变的条件下,若均匀半空间的电导率变为原来的 *K* 倍时,观测到的 瞬变响应的磁场值等于原瞬变响应的磁场值。这说 明地空系统均匀半空间磁场具有平移性质。

3 大定源地空系统全区视电阻率定义

3.1 均匀半空间地空系统磁场响应特征

为了更加直观地的展现地空系统均匀半空间响应的平移伸缩性质,将在同一高度接收,位于同一偏移距处电导率分别为 $K\sigma$ 与 σ 的理论瞬变响应曲线绘制于单对数坐标下(图 2),模型采用方形回线发射,线框边长 200 m,发射电流 I_0 =1 A,接收高度Z=-100 m。从图中不难看出,其中任意一条曲线必

可由另外一条曲线平移得到,这个曲线的平移轨迹 曲线称为平移曲线,计算两者斜率可得

 $k = \frac{B_p(t)(K\sigma, a, Kt) - B_p(t)(\sigma, a, t)}{\log(Kt) - \log t} = \frac{0}{\log K} = 0$ 。 由此可知, 平移曲线是一条斜率为 0 平行于 x 轴的

直线。 图 2 显示,在框内 r=50 m 处观测到的 B₂随时间的变化曲线是一个单调减函数,这与中心点处的变化规律是一致的^[14];在 r=300 m(框外 200 m)处观测到的 B₂随时间的变化曲线并不是单调的,其在早期为负值,到晚期转为正值,这种现象可以通过

"烟圈效应"来解释^[15],符号改变的时间可以通过 {t}_{µs} = $\frac{0.121 \{r\}_{m}^{2}}{\{\rho\}_{\Omega \cdot m}}$ 计算得到,即符号改变的时间与 偏移距和地下电阻率有关。



图 2 地空系统均匀半空间中不同偏移距磁场垂直分量曲线的平移特性

3.2 地空系统平移算法的具体实现

引入文献[9]中的平移截距概念,对于地空系 统磁场而言,由于平移曲线平行于 x 轴,可将平移截 距定义为

$$b(t) = B_n(t)(\sigma, a, t)$$

即可认为此平移截距为磁场值。所有平移截距构成 的曲线称为平移截距曲线。从图 2 中可知,地空系 统均匀半空间的平移截距曲线可分为两类。

(1)在中心点及框内偏移距较小处,平移截距 曲线为单值函数,可以直接利用插值办法算出视电 阻率的唯一解。

(2)框外偏移距较大且发生"极性反转"现象时,平移截距曲线为上凸的双值曲线,其解并不是唯一的,在转折点处存在"无解"以及"双解"现象。参照文献[9]中的处理方法,以截距最大值对应的时间点 t_m 为界,将截距曲线分为左右两支,然后让它们分别与理论平移截距曲线的左右两支相对应,则

每段曲线都是单值的。这样既可消除多解性的问题,也可采用插值的办法来直接计算,速度极快。

3.3 视电阻率定义的中解的存在性与唯一性问题

中心回线方式的磁场强度响应随时间变化的曲 线是一个单值函数,然而,在大偏移距情况下,磁场 强度随时间的变化曲线却并不是单调的。野外工作 时并不是均匀半空间的情况,而是复杂的地电情况, 在观测参数固定的情况下,实测截距参数曲线的极 大值与理论截距参数曲线的极大值并非完全相等, 可能出现以下三种情况:① $b_{obsmax}(t) < b_{max}(t)$,即 出现视电阻率值的"双解"现象,导致全域视电阻率 曲线并不连续,给进一步解释带来困难;② $b_{obsmax}(t)$ = $b_{max}(t)$,这是最理想的情况,电阻率有唯一解; ③ $b_{obsmax}(t) > b_{max}(t)$,超出了均匀半空间条件下所 能达到的极大值,出现"无解"的现象,导致测深视 电阻率曲线不连续。

关于"双解"和"无解"问题,主要存在于电阻率

的过渡段,是由于这一段的响应变化不单调造成的。 如何解决这类问题,已有许多学者做了大量的工作。 苏朱刘^[7]等在中心回线的全期视电阻率定义中引 入了虚拟全区视电阻率和虚拟半径的概念,利用感 应电动势的最大值对观测感应电动势进行校正,保 证视电阻率在全时段有解,但是该方法要求实测的 响应曲线是完整的,这就使得这种方法存在一定的 局限性。白登海等^[8]借助瞬变场参数把整个瞬变 过程分为早期阶段、早期到晚期的转折点、晚期阶 段,然后分别迭代求取早期、晚期视电阻率的精确 值,进而通过转折点构成一条完整的全程视电阻率 曲线,然而迭代方法速度慢,且精度难以保证。王华 军^[9]指出可以通过在实测平移截距极大点附近设 一个过渡区,而过渡区内的视电阻率值,通过插值方 法得到,以保证获得平滑、连续的全区视电阻率曲 线。综上所述,对于本文中过渡区的处理,为保证全 时段视电阻率曲线的连续性以便于成图和解释,笔 者沿用插值方法计算过渡区段的视电阻率值。



依据上述算法,针对水平三层地层几种典型模型进行计算,并与感应电动势平移算法进行对比,分 析这两种方式对于异常体的反映情况。

模型参数设置如下:采用方形回线发射,发射回 线边长 100 m,发射电流 I_0 =1 A,接收高度 Z=-100 m,各层电阻率为 $\rho_i(i=1,2,\dots,n)$,相应层厚为 $h_i(i=1,2,\dots,n)$ 。

4.1 磁场强度平移算法多分量模型验证

目前,瞬变电磁法的研究方法,不管是理论上还 是在实际应用中,大都只是局限在磁场的垂直分量 上。但是,随着对物探精度要求的提高,单一对磁场 垂直分量的反演解释已经不能满足需要,因此研究 瞬变电磁法多分量解释技术意义在于用以提高其综 合解释精度,增强其探测复杂地质构造的能力。

图 3、图 4 分别为不同模型、不同偏移距下利用 磁场垂直分量与水平分量求得的地空系统全域视





图 4 K 型模型磁场强度平移法全域视电阻率曲线随偏移距变化情况

电阻率曲线。从图 4 中可以看出,视电阻率曲线在 形态上很好地反应了各电性层参数,对于中间层的 反应,良导层的效果比高阻层的效果更好;其次,垂 直分量与水平分量的视电阻率曲线形态基本一致; 最后,从图中可以看出,曲线形态与偏移距无关,即 无论是垂直分量还是水平分量,全域视电阻率都不 受偏移距的影响。

4.2 磁场强度法与电动势法视电阻率曲线特征

以三层模型为例,分别给出磁场强度与感应电 动势视电阻率曲线,分析两类方法视电阻率曲线表 现特征,并进一步分析其对于异常体的分辨能力。 就此引入在数学领域经常使用的相对变化率的概 念,定义相对异常幅度:

对于低阻异常体的分辨,选用三层 H 型地电模型,接收高度为 100 m,偏移距为 30 m,以垂直分量为例(表 1、图 5)。对于高阻异常体的分辨,选用 K 型地电模型,见表 1、图 6。

| 模型 | 中间层厚度 | 利用 B _z 定义得到 | 利用 $\partial B_z / \partial t$ 定义得到 |
|-----|-------|------------------------|-------------------------------------|
| | m | 相对异常幅度/% | 相对异常幅度/% |
| H 型 | 5 | 29.4987 | 35.7848 |
| | 10 | 45.8680 | 53.0962 |
| | 30 | 71.9108 | 77.4891 |
| | 50 | 80.9525 | 85.1656 |
| K 型 | 100 | 1.2523 | 1.4460 |
| | 150 | 1.8250 | 2.1284 |
| | 200 | 2.3732 | 2.8001 |
| | 250 | 2.9074 | 3.4577 |



图 5 H 型模型平移法全域视电阻率曲线对比

通过以上两类模型曲线可以看出:

(1)两种视电阻率的定义方式都对异常体有所 反应,对于低阻异常体的反应明显优于高阻异常体,



图 6 K 型模型平移法全域视电阻率曲线对比

相对感应电动势法,磁场强度定义的视电阻率曲线 形态简单,易于判断曲线类型,并且不存在 Overshoot(当地下电阻率由高阻突然变为低阻时,在界 面附近出现的一个向高阻震荡的极大值)或 Undershoot(当地下电阻率由低阻突然变为高阻时,在界 面附近出现的一个向低阻震荡的极小值)^[16]。

(2)中间层越厚,视电阻率曲线的异常表现越 明显,相对异常幅度也越大,并且感应电动势法的 Overshoot 现象也越明显。

(3) 从表 1、表 2 中可以看出,两种方法计算得 到的相对异常幅度值差异不大,感应电动势的分辨 能力稍强。

5 结论

受文献[9]的启发,提出了一种适合瞬变电磁 地空系统的全空间全域视电阻率定义方法,实现在 时间上不分早晚、在距离上不分远近的全域视电阻 率定义。根据文中的模型计算结果和讨论,总结出 以下几点结论。

(1)利用磁场强度的平移性质对全域视电阻率 进行定义,使用该方法无需迭代,计算速度极快,大 大提高了效率,为地空系统大数据量的解释工作提供了基础。

(2)大定源地空系统全域视电阻率曲线能准确 反映地下介质的电性分布,垂直分量与水平分量的 全区视电阻率曲线形态一致,并且曲线形态均不受 偏移距的影响。

(3)通过对比磁场强度法与电动势法视电阻率 曲线,发现利用感应电动势定义视电阻率存在不同 程度的假极值现象,特别是 H 型地层假极值现象尤 为明显,而磁场强度法则不存在此种现象,能够更加 真实反应地下的电性特征。但是,用感应电动势定 义视电阻率的分辨率更高,对于异常体的反映能力 更好,实际工作中应根据工作需要选择合适方法。

参考文献:

- [1] Nabighian, Misac N, ed. Electromagnetic methods in applied geophysics[M].SEG Books, 1988, 2.
- [2] Verma S K, Mogi T, Allah S A.Response characteristics of GREA-TEM system considering a half-space model [C]//20th IAGA WG1.2 Workshop on electromagnetic Induction in the earth, 2010.
- [3] Smith R S, Annan A P, McGowan P D.A comparison of data from airborne, semi-airborne, and ground electromagnetic systems [J]. Geophysics, 2001, 66(5):1379-1385.
- [4] Mogi T, Tanaka Y, Kusunoki K, et al. Development of grounded electrical source airborne transient EM (GREATEM)[J].Explora-

tion Geophysics, 1998, 29(2):61-64.

- [5] 嵇艳鞠,王远,徐江,等.无人飞艇长导线源时域地空电磁勘探 系统及其应用[J].地球物理学报,2013,56(11):36-40.
- [6] 殷长春,朴化荣.电磁测深法视电阻率定义问题的研究[J].物 探与化探,1991,15(4):290-299.
- [7] 苏朱刘,胡文宝.中心回线方式瞬变电磁测深虚拟全区视电阻 率和一维反演方法[J].石油物探,2002,41(2):216-221.
- [8] 白登海, Meju M A, 卢健, 等.时间域瞬变电磁法中心方式全程 视电阻率的数值计算[J].地球物理学报, 2003, 46(5):697-704.
- [9] 王华军.时间域瞬变电磁法全区视电阻率的平移算法[J].地球 物理学报,2008,51(6):1936-1942.
- [10] 许洋铖,林君,嵇艳鞠,等.航空时间域电磁法回线源有限差分 初始场计算[J].电波科学学报,2010(2):259-264.
- [11] 李貅.瞬变电磁测深的理论与应用[M].西安:陕西科学技术出版社,2002.
- [12] 朴化荣. 电磁测深法原理[M].北京:地质出版社,1990.
- [13] Sun H, Li X, Li S, et al.Multi-component and multi-array TEM detection in karst tunnels [J].Journal of Geophysics and Engineering, 2012,9(4):359.
- [14] Raiche A P.Comparison of apparent resistivity functions for transient electromagnetic methods [J]. Geophysics, 1983, 48 (6): 787-789.
- [15] 李金铭.地电场与电法勘探[M].北京:地质出版社,2005.
- [16] Raiche A P, Spies B R. Coincident loop transient electromagnetic master curves for interpretation of two-layer earths [J]. Geophysics, 1981, 46(1):53-64.

The Definition of Full-domain Apparent Resistivity Based on Air-ground Transient Electromagnetic Data

ZHAO Yue¹, WANG Yi-Peng^{1,2}, LI Xiu¹

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang 'an University, Xi'an 710054, China; 2. AVIC Geotechnical Engineering Institute Co., Ltd., Beijing 100098, China)

Abstract: A fast and efficient numerical calculation method of full-domain apparent resistivity for AGTEM has been developed in this paper. We defined the full-domain apparent resistivity using the vertical and horizontal component of time domain magnetic field, in this way we can achieve full space, all time domain apparent resistivity definition. We analyzed thoroughly the Air-ground transient electromagnetic field analytic expression in homogeneous half space, and discovered that the Air-ground time domain response can be expressed in similar polynomial with the central vertical response, use the apparent resistivity translation algorithm, we can achieve full-domain apparent resistivity definition. Model calculation results show that the apparent resistivity definition method does not require iterative, with quicker speed and higher precision. Finally, compared the magnetic field and the voltage based apparent resistivity for resolution of abnormal body.

Key words: Air-ground transient electromagnetic method system; Apparent resistivity; Multi-component; Full-domain

作者简介:赵越(1989-),女,江西九江人,博士研究生,主要从事瞬变电磁地空系统、航空时间域电磁技术研究。 通讯作者:李貅(1958-),男,吉林长春人,博士,教授,研究方向为电磁法理论与应用。