

文章编号:1001-1986(2003)03-0056-03

利用连分式定义瞬变电磁法全区视电阻率研究

翁爱华,陆冬华,刘国兴

(吉林大学地球探测科学与技术学院,吉林 长春 130026)

摘要:介绍了一种新的全区视电阻率计算方法。该方法利用连分式迭代求解非线性方程技术,直接对均匀半空间电偶源瞬变电磁法观测的垂直磁场与电阻率的非线性方程直接求解。利用该数值方法对层状介质进行了理论计算。数值计算结果表明,采用连分式方法可直接求出反映地电断面结构的瞬变电磁法全区视电阻率。

关键词:视电阻率;连分式;电偶极源;瞬变电磁法

中图分类号:P631.3⁺25 **文献标识码:**A

1 引言

电磁法勘探解释中的一个基本问题是将观测到的电场或磁场(电动势)定义为对应的视电阻率。但即使均匀半空间模型的电磁场分量,模型电阻率与这些场量之间也是非线性的,因此很难将电阻率用

这些单独场分量显式地表示出来,从而多采用近似定义方法^[1]。当不满足近似定义条件时,近似定义的视电阻率往往不能反映出电阻率的真实分布,尽管此时电磁场分量本身就包含这些信息。为此,人们提出了既适合近区(晚期)或远区(早期),还能将中间过渡区的电阻率也反映出来的所谓全区视电阻

收稿日期:2002-07-29

作者简介:翁爱华(1969—),男,安徽天长人,吉林大学讲师,博士生,从事电(磁)法勘探与地面核磁共振理论及应用研究。

- [2] 考夫曼 A A,凯勒 G V. 频率域和时间域电磁测深[M]. 北京:地质出版社,1987.
- [3] Anderson W L. A hybrid fast Hankel transformation algorithm for electromagnetic modeling[J]. Geophysics, 1989, 54(2): 263 - 266.
- [4] 华军,蒋延生,汪文秉. 双重贝塞尔函数积分的数值计算[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(3): 58 - 62.
- [5] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法[M]. 北京:地质出版社, 1997.
- [6] Lee K H, Liu G, Morrison H F. A new approach to modeling the electromagnetic response of conductive media [J]. Geophysics, 1989, 54(9): 1180 - 1192.
- [7] Mier Genshenson. Simple interpretation of time-domain electromagnetic sounding using similarities between wave and diffusion propagation[J]. Geophysics, 1993, 62(3): 763 - 774.
- [8] Lee K H, Xie G Q. A new approach to imaging with low-frequency electromagnetic fields[J]. Geophysics, 1993, 58(6): 780 - 796.
- [9] 陈本池. 瞬变电磁场的波场变换与偏移成像理论研究[D]. 北京:中国地质大学博士论文, 1998.
- [10] 陈本池,周凤桐,李金铭. 瞬变电磁场的波形变换研究[J]. 物探与化探, 1999, (3).
- [11] 徐建华. 层状媒质中的电磁场与电磁波[M]. 北京:石油出版社, 1997. 33 - 34.
- [12] Weng Cho Chew, 聂在平,柳清伙. 非均匀介质中的场与波[M]. 北京:电子工业出版社, 1992. 405 - 408.
- [13] Høversten GM, Morrison H F. Transient fields of a current loop source above a layered earth[J]. Geophysics, 47(7): 1068 - 1077.
- [14] Nabighian M N. Quasi-static transient response of a conductive half-space An approximate representation [J]. Geophysics, 44: 1700 - 1705.
- [15] 邹凤梧,刘中柱,周怀春. 积分表汇编[M]. 北京:宇航出版社, 1992.

Comments on pulse broadening phenomena of wavefield transformation in transient electromagnetic exploration

HUA Jun, JIANG Yan-sheng, WANG Wen-bing (Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is possible using ray tomography to explain the response data of transient electromagnetic(TEM) exploration when we use wavefield transformation technology. But the pulse shape broadening phenomena of transformed wave field with increasing the receiver offset distance and the earth conductivity reduce the space resolution of the interpretation significantly. In this paper, we obtained the expression of the electrical vector potential of the large loop antenna which is excited by the step current in uniform losses space. By this expression, we discussed the relationship of the response pulse width with the receiver offset distance and the media permittivity. By using that relationship and the distribution characteristic of the induction eddy current in the earth, we explained the pulse broadening phenomena. We find the pulse broadening phenomena in the fictitious loss media resulting from the space distribution characteristics of the induced eddy current in the earth. Because the propagation velocity of the eddy current is very slow than the light velocity, the broadening phenomena in the fictitious losses media is also very evident than that in the physical losses media such as free space.

Key words: TEM; inversion; wavefield transformation; pulse width; ray tomography technology

率定义。全区视电阻率定义主要有两个方法,一种是数值逼近方法,其中最成功的是多项式逼近算法^[2]。昌彦君等改进该方法并对小偏移距(收发距小于第一电性层厚度)电场分量定义了全区视电阻率^[3],陈明生等修正了该方法的多项式系数,并将该方法的晚期时间范围拓展到几十秒,以适应大偏移距的需要^[4]。由此可见,多项式逼近需要采用合适的多项式系数才可得到较好的结果;另一种方法是迭代方法。该方法适合于任意有限区间内具有单调性的电磁场分量全区视电阻率的计算,已成功地运用于长偏移距瞬变电磁法(LOTEM)全区视电阻率的定义^[5,6],但该方法要求知道反函数的大致值域,且收敛较慢。由于连分式求解非线性方程对反函数的初值不敏感,迭代收敛快,本文以电偶源瞬变电磁测深法观测的垂直磁场为例,介绍利用该方法迭代求解电磁场反函数的方法。文中首先给出均匀半空间电偶源瞬变电磁场垂直分量的表达式,接着介绍了利用连分式求解非线性方程的原理,并给出具体的实现过程。在此基础上,给出具体的数值模拟结果。

2 电偶极源瞬变电磁法垂直磁场视电阻率定义

电偶极子源在均匀半空间表面产生的垂直磁场 $H_z(t)$ 为^[1]:

$$H_z(t) = \frac{P_E}{2r^2} \left[\left(1 - \frac{3}{2}x\right) \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{x}}\right) + 3\sqrt{x} e^{-1/\sqrt{x}} \right], \quad (1)$$

其中 r 为收发距; t 是观测时间; P_E 是发射偶极矩; $\operatorname{erf}(x)$ 为误差函数,且

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt, \quad (2)$$

$$x = \frac{4t}{\mu_0 r^2}, \quad (3)$$

为均匀半空间的电导率。用相应均匀半空间稳定磁场归一化(1)式有:

$$h_z(t) = \left(1 - \frac{3}{2}x\right) \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{x}}\right) + 3\sqrt{x} e^{-1/\sqrt{x}}, \quad (4)$$

令(4)式对 x 的解为 $g[h_z(t)]$, 则由(3)式可确定均匀大地电导率为:

$$= \frac{4t}{\mu_0 r^2 g[h_z(t)]}, \quad (5)$$

如果介质不均匀,该求解的电导率便称为视电导率,其倒数便是视电阻率。这样,由(4)式求出关于 x 的反函数,即可得到介质的(视)电阻率。下面介绍利用连分式求解该反函数的方法。

3 连分式求解非线性方程原理

连分式的功能十分强大,可以进行求极值、积

分、求导等运算,这里介绍其求解非线性方程的功能^[7]。称如下的表达式

$$b_0 + \frac{a_0}{b_1 + \frac{a_1}{b_2 + \frac{a_2}{b_3 + \dots + \frac{a_{i-1}}{b_i + \dots}}} \quad (6)$$

为连分式,其中分式 b_i 称作连分式的第 i 节, a_{i-1} 与 b_i 称作连分式第 i 节的两个项,且 a_i 与 b_i 称作连分式的部分分子和部分分母, $i = 1, 2, 3, \dots$

设所要求解的方程为: $f(x) = C$, 并记 $F(x) = f(x) - C$ 。为了利用连分式求方程的解,将 $F(x)$ 反函数用如下的连分式表示:

$$x(F) = a_0 + \frac{F - F_0}{a_1 + \frac{F - F_1}{a_2 + \frac{F - F_2}{\vdots} a_n + \frac{F - F_n}{\vdots}}} \quad (7)$$

其中 a_i 为待定系数, $F_i = F(x_i)$, $x(F)$ 为方程解的近似值。这样求 $F(x)$ 反函数转化为求形如(7)式的连分式系数。为此首先任意给 3 个初始值 x_0, x_1 和 x_2 , 计算相应的函数值 $F(x_0), F(x_1)$ 和 $F(x_2)$, 再令下面的函数:

$$x(F) = a_0 + \frac{F - F_0}{a_1 + \frac{F - F_1}{a_2}} \quad (8)$$

在 $F(x_i) = F_i$ 点处的值为 $x(F_i) = x_i, i = 0, 1, 2$ 。由于所调节的变量 x 使 $f(x)$ 等于 C , 所以令 $F = 0$ 并带入 $x(F)$ 中, 得出新的控制变量近似值:

$$x_3 = a_0 - \frac{F_0}{a_1 - \frac{F_1}{a_2}} \quad (9)$$

再把 x_3 代入 $f(x)$ 中求出相应的差 $F(x_3) = f(x_3) - C$ 。若 $F(x_3) = 0$, 则 x_3 为所求的解。否则,把点 (F_3, x_3) 代入 $x(F)$ 中确定系数 a_3 , 再求出新的控制变量近似值:

$$x_4 = a_0 - \frac{F_0}{a_1 - \frac{F_1}{a_2 - \frac{F_2}{a_3}}} \quad (10)$$

如果 $F(x_4)$ 为零, 则 x_4 为所求的解。否则,继续上述过程直到近似解 x 满足 $F(x) = 0$ 。在求解过程中,待定系数由 $x(F_i) = x_i$ 的条件来确定,具体公式如下:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= x_0 \\
 a_i &= - \frac{(x_i Q_{i-2} - P_{i-2})(F_i - F_{i-1})}{x_i Q_{i-1} - P_{i-1}} \\
 P_i &= a_i P_{i-1} + (F - F_{i-1}) P_{i-2} \\
 Q_i &= a_i Q_{i-1} + (F - F_{i-1}) Q_{i-2} \quad , \quad (11) \\
 P_{-1} &= 1 \\
 P_0 &= a_0 \\
 Q_{-1} &= 1 \\
 F_i &= F(x_i)
 \end{aligned}$$

应用上述公式时,一般取 $i \leq 15$ 就可以得到方程的解。但是由上述算法直接计算非线性方程,可能会导致连分式的部分分子或分母过大。为此,在实际计算时采用刘宴兵提出的改进迭代算法^[8]。

4 数值结果

根据上述算法分别对三层和四层模型进行了模拟计算。图 1 给出了收发距 r 对全区视电阻率定义的影响。从图可见,全区定义的视电阻率不受收发距的影响,且曲线形态基本反映地电模型,同时首枝与尾枝较准确地反映了模型电阻率真值。

图 2 和图 3 给出了三层与四层模型计算结果,其中图 2 给出了电阻率为 100 $\Omega \cdot m$ 的均匀半空间中插入厚度 $H = 1\,000\text{ m}$,但导电性不同的电性层时全区视电阻率曲线,而图 3 给出了四层模型的计算结果,模型参数取自 Strack^[9],其第三层的厚度变化。从这两个图可见,全区视电阻率曲线也基本完全反映了模型电性变化规律,但对低阻层反映明显,而对高阻层反映不灵敏。

5 结论

本文以电偶源垂直磁场为例,介绍了利用连分式迭代技术求解电磁测深全区视电阻率的方法。通过数值结果可见:

a. 定义全区视电阻率有助于电磁测深的数据解释,因为全区视电阻率较真实地反映了电阻率的

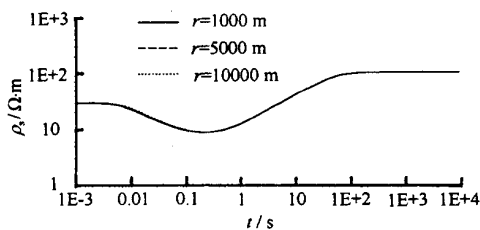


图 1 H 型地电断面不同收发距时全区视电阻率曲线
注:模型参数: $\rho_1 = 30\ \Omega \cdot m$, $\rho_2 = 5\ \Omega \cdot m$, $\rho_3 = 100\ \Omega \cdot m$,
 $H_1 = 500\text{ m}$, $H_2 = 1\,000\text{ m}$

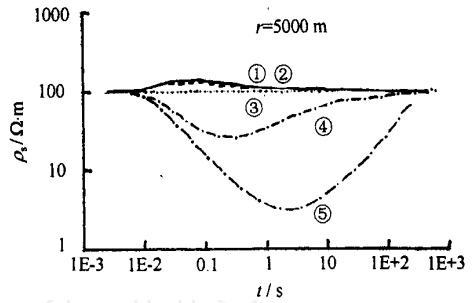


图 2 中间层电阻率变化的三层地电模型的全区视电阻率曲线(改变中间层电阻率)
、 、 、 、 —分别表示第二层电阻率为 1, 10, 100, 500, 1 000 $\Omega \cdot m$ 时的计算结果
注:模型参数: $\rho_1 = 100\ \Omega \cdot m$; $\rho_2 = 1, 10, 100, 500, 1\,000\ \Omega \cdot m$;
 $\rho_3 = 100\ \Omega \cdot m$; $H_1 = 1\,000\text{ m}$, $H_2 = 1\,000\text{ m}$

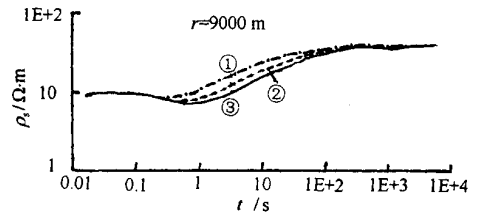


图 3 四层模型全区视电阻率曲线(改变第三层厚度)
、 、 分别表示第三层厚度分别为 1 000, 1 500, 2 000 m 时情形
注:模型参数: $\rho_1 = 10\ \Omega \cdot m$, $\rho_2 = 80\ \Omega \cdot m$, $\rho_3 = 5\ \Omega \cdot m$, $\rho_4 = 40\ \Omega \cdot m$,
 $H_1 = 300\text{ m}$, $H_2 = 200\text{ m}$; $H_3 = 1\,000, 1\,500, 2\,000\text{ m}$

垂向变化;

b. 连分式迭代求解电磁测深全区视电阻率所对应单调非线性方程是有效的。

此外,本文虽然仅以电偶源垂直磁场为例讨论了利用连分式技术迭代求解全区视电阻率的方法,对于其他场分量,因为它们都是电阻率的单调函数,因此本文介绍的方法同样可适用于这些场分量的视电阻率计算。

参考文献

- [1] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京:地质出版社,1990.
- [2] 李吉松,朴化荣. 电偶源瞬变电磁测深一维正演及视电阻率响应研究[J]. 物探化探计算技术,1993,15(2):191-200.
- [3] 昌彦君,罗延钟,仇高喜. 全时域时间谱视电阻率算法研究[J]. 物探化探计算技术,1998,20(3):193-198.
- [4] 陈明生,田小波. 电偶源瞬变电磁测深研究(四)一瞬变电磁测深视电阻率[J]. 煤田地质与勘探,1999,(4):52-55.
- [5] Yang S. A. Single apparent resistivity expression for long-offset transient electromagnetics[J]. Geophysics,1986,51(6):1291-1297.
- [6] 严良俊等. 长偏移距瞬变电磁测深的全区视电阻率求取及快速反演方法[J]. 石油地球物理勘探,1999,34(5):532-538.
- [7] 邹海. 最优设计中的新算法[M]. 北京:新时代出版社,1984.
- [8] 刘宴兵. 连分式求值算法的改进实现[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版),1999,11(1):38-40.
- [9] Strack K.M. Methods in geochemistry and geophysics: Exploration with deep transient electromagnetics[M]. Netherlands: Elsevier Science Publishers,1992.

文章编号:1001-1986(2003)03-0059-03

瞬变电磁测深的微分电导成像

李 貅^{1,2},全红娟²,许阿祥²,马 宇²

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院,陕西 西安 710049;

2. 长安大学地质工程与测量工程学院,陕西 西安 710054)

摘要:通过对等效导电平面方法原理的阐述,指出了利用视纵向电导参数进行瞬变电磁测深资料解释的优越性。同时,为了提高对电性层位的分辨能力,在明确电导及其导数曲线物理含义的基础上,采用B样条函数对实测数据进行处理,实现了电导参数的微分成像。实践证明,采用该方法的成像结果与其他反演结果吻合较好,其“电性同相轴”以直观、形象的面貌清晰地展示了电性界面的分布形态。

关键词:层状介质;视纵向电导;微分成像

中图分类号:P631.3⁺25 **文献标识码:**A

1 引言

对于层状地电断面模型,在以寻找低阻层为目的的勘探中,采用视纵向电导反演,等值范围窄,图像清晰易辨,特别是在解决工程问题和寻找地下水方面效果较好。用这种方法反演成像一般要比视电阻率法更直观,这是因为:根据电磁理论,用一导电平面来代替地下均匀介质,然后用镜像法可以方便地求出空间任一点的感应电磁场随时间 t 的增减,导电平面以速度 $1/\mu_0$ 上下“浮动”,从而改变空间任一点感应电磁场的振幅和相位。随着时间的推移,瞬变电磁场向地层深处传播,若深部出现新的导电层,则总纵向电导值增加。为了突出总纵向电导随深度增加的变化,对纵向电导进行微分成像,使得层状特征更加明显。这就是根据纵向电导曲线有可能比视电阻率曲线更直观地确定导电层存在的原因。

2 方法的基本原理

2.1 瞬变响应的近似计算

设在均匀大地表面上有半径为 a 的圆形回线,其中通以阶跃电流

$$I(t) = \begin{cases} I; & t < 0 \\ 0; & t \geq 0 \end{cases},$$

由于 $t=0$ 时刻断开电源,则在 $t \geq 0$ 时,地中产生涡旋电流,在地表任一点便可观测到由此涡流产生的电磁场。根据电磁理论,可用一导电平面来代替地下均匀介质,然后用镜像法可以方便地求出空间任一点的瞬变电磁响应:

$$\frac{\partial B_z(t)}{\partial t} = \frac{-6I}{S a^2} \frac{\bar{m}}{(1+4\bar{m})^{5/2}}, \quad (1)$$

其中 $\bar{m} = \frac{h}{a} + \frac{t}{\mu_0 a}$; h 为等效导电平面的深度。

对于水平层状地电断面,也可用等效导电平面

收稿日期:2002-08-23

作者简介:李 貅(1958—),男,吉林长春人,西安交通大学博士生,从事瞬变电磁场的理论和应用研究工作。

Definition of whole zone apparent resistivity for transient electromagnetic method of current dipole source

WONG Ai-hua, LU Dong-hua, LIU Guo-xing

(Department of Applied Geophysics, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: A new scheme to define all time apparent resistivity is introduced. For this method, the solution of a nonlinear monotone function, which is very common in electromagnetic soundings, is obtained via continued fraction iteration technique. Numerical results for layered earth show that the new method can be successfully applied to the definition of all time apparent resistivity which can reflect the real variation of geoelectrical section.

Key words: apparent resistivity; continued fraction; current dipole; TEM