

计算矩形大定源回线瞬变电磁测深全区视电阻率

张成范¹, 翁爱华², 孙世栋³, 董瑞春²

1. 吉林省有色金属地质勘查局, 长春 130026
2. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026
3. 中国建材工业地质勘查中心 安徽总队, 合肥 230022

摘要:介绍了矩形大定源瞬变电磁测深全区视电阻率的计算方法。根据大定源感应电动势关于电阻率非线性变化特点,利用二分法计算感应电动势的全区视电阻率。在此过程中,计算首先从早期感应电动势开始,并将计算得到的视电阻率作为下个窗口视电阻率计算的依据。以此类推,得到全部时窗的视电阻率。理论模型和实际数据的计算结果表明文中提出方法的有效性和正确性。

关键词:矩形大定源;瞬变电磁测深;全区视电阻率;二分法

中图分类号:P631.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5888(2009)04-0755-04

Computation of Whole-Time Apparent Resistivity of Large Rectangular Loop

ZHANG Cheng-fan¹, WENG Ai-hua², SUN Shi-dong³, DONG Rui-chun²

1. Jilin Bureau of Nonferrous Metals Exploration, Changchun 130026, China
2. College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China
3. Anhui Branch of China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry, Hefei 230022, China

Abstract: The authors introduce a new method for computing the whole-time apparent resistivity from the transient response generated by a large rectangular loop over the ground. In this method, bisection strategy is used to get the whole-time apparent resistivity from the induced voltage of a uniform half space model. We start our computation in an early time window, and use the corresponding result in the second time window. This process is repeated until all the time intervals have been processed. The test on the theoretical model and real data show that the presented method is correct and effective.

Key words: large loop source; TEM sounding; whole-time apparent resistivity; bisection method

0 引言

大定源回线又称为大固定发射-移动接收组合,简称为大回线。在野外,地面大定源观测装置常用矩形大回线作为发射源,在回线外或者回线内测量

垂直磁场产生的感应电动势。为由观测的感应电动势获得地下电阻率的变化规律,一条重要的途径是计算视电阻率。

由于瞬变电磁场表达式是关于大地电阻率较为复杂的函数,因此由观测的感应电动势获得对应的

收稿日期:2008-11-27

基金项目:国家“863”计划项目(2006AA06Z109);国家自然科学基金项目(40874050)

作者简介:张成范(1964—),男,吉林德惠人,高级工程师,主要从事地质勘查与研究, E-mail: zhangchengfan@sohu.com

通讯联系人:翁爱华(1969—),男,安徽天长人,副教授,博士,主要从事电磁法勘探及地面核磁共振的理论模拟与应用研究, E-mail: wengaihua@email.jlu.edu.cn.

视电阻率,通常采用各种近似算法。但在近似条件不满足时,计算的视电阻率将发生畸变^[1]。因此,最好利用全区视电阻率对数据进行解释^[2]。所谓的全区视电阻率,就是直接根据指定装置的均匀大地电磁场表达式,利用数值算法求解其与对应观测场值形成的方程的根^[3]。目前针对不同装置特点,已经提出了多种全区视电阻率计算方法,如多项式逼近^[3]、连分式求根^[4]、逆样条插值^[5]、多场联合法^[6]以及数值迭代^[7-8]等。

但上述工作并未涉及矩形大定源回线工作装置的全区视电阻率计算。本文将围绕这一问题展开。首先计算并讨论了矩形大定源回线均匀大地的垂直磁场感应电动势的变化特点,建议在电阻率的有效变化区间内利用二分方法计算全区视电阻率。鉴于感应电动势的非单调性,在计算过程中,利用早期时窗计算的视电阻率判断感应电动势单调区间,并从早期时窗开始向晚期逐时窗计算。在此基础上,利用理论模拟结果对方法的正确性进行了检验。最后将该方法应用于实际数据的处理。

1 均匀半空间大定源感应电动势

李建平等给出了敷设在地表的任意形状大定源回线产生的瞬变电磁响应计算方法^[9],本文仅就目前野外使用最普遍的矩形大定源进行讨论。矩形回线在水平地表面产生的垂直磁场感应电动势表达式为^[3]

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = \frac{IA_R}{2\pi\sigma} [& F(y_1, x_1) - F(y_1, x_2) + \\ & F(x_2, y_2) - F(x_2, y_1) + F(y_2, x_2) - \\ & F(y_2, x_1) + F(x_1, y_1) - F(x_1, y_2)] \end{aligned} \quad (1)$$

式中: σ 为均匀半空间介质的电导率, I 是供电电流, A_R 是接收线圈的磁矩,并且

$$\begin{aligned} x_1 = x_R + L_x/2, y_1 = y_R + L_y/2, \\ x_2 = x_R - L_x/2, y_2 = y_R - L_y/2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中: (x_R, y_R) 为相对回线中心的接收点坐标, L_x 、 L_y 为发射回线的边长。而 $F(x, y)$ 的计算公式为

$$\begin{aligned} F(x, y) = \left(\frac{2+x^2/\rho^2}{x^3} \right) \frac{y}{\rho} \operatorname{erf}(u_\rho) - \\ \frac{2u_y}{\sqrt{\pi}x^3} \left(\frac{x}{\rho} \right)^2 e^{-u_\rho^2} - 2 \frac{1+u_x^2}{x^3} e^{-u_x^2} \operatorname{erf}(u_y) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$, $u_x = \sqrt{\mu_0\sigma x^2/4t}$, $u_y = \sqrt{\mu_0\sigma y^2/4t}$, $u_\rho = \sqrt{\mu_0\sigma\rho^2/4t}$, erf 为概率积分。

2 感应电动势的特点

从(1)式可见,大定源回线的均匀半空间垂直磁场感应电动势是电导率的隐函数。因此,由测量的感应电动势反求电导率,必须采用非线性方程求根技术。原则上,所有的非线性方程求根方法都可以应用到该问题中。但利用这些非线性方程求根方法需要对函数本身性质进行研究,确定根的存在性、唯一性以及地球物理合理性。为此,计算了边长为600 m×200 m的大定源回线中心点感应电动势在观测时刻分别为 1.624×10^{-5} s和0.1 s时随电导率的变化曲线(图1)。从图可见:(1)感应电动势是电导率的严重非线性函数,如果观测的电动势有解,其解也将非惟一。因此,采用一般的非线性方程求根技术获得的电导率对解的初始猜测依赖性很大。如果不做细致的分析,给出合理的猜测,会得出不符合地球物理现象的电导率。(2)对给定的装置组合,在某个观测时刻,存在最大理论感应电动势。如果相应的观测数据比该最大值还大,方程无解,则找不到合适的电导率与之对应,全区视电阻率计算失败。(3)对于早期时窗,电导率在一个较大的范围内变化时,比如从 10^{-4} S/m增加到 10^2 S/m,其感应电动势随之单调变化,该单调变化区间与绝大多数岩矿石的电导率变化范围一致^[10],为采用数值求根创造了条件。

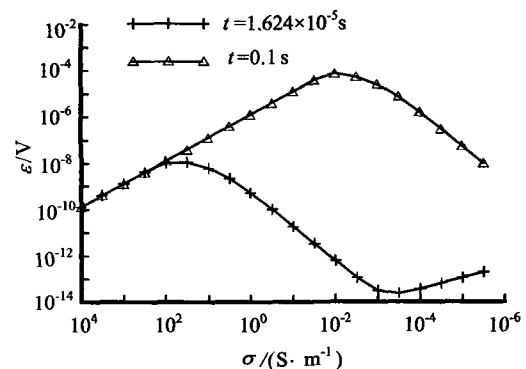


图1 感应电动势随均匀大地电导率变化情况

Fig. 1 Variation of induced voltage with conductivity of half space

3 二分法求解全区视电阻率

利用迭代法等非线性方程求根方法对初始猜测要求高,有时即使给出合理的猜测,求得的根也可能

不合理。如果对解的区间作了限制,并且在此区间中函数是单调的,那么二分法求根技术是一个非常好的选择。事实上,从上面的分析可以看出,大定源回线感应电动势具有这样的单调特点。

从图 1 可见,为了采用二分法获得大定源法的全区视电阻率估计,可以在一个较大的范围内,比如电导率从 10^{-4} S/m 增加到 10^2 S/m,计算特定时间窗口的感应电动势随电导率的变化规律。前已指出,对于早期时窗,此电导率范围基本与感应电动势的单调变化区间一致,故由二分法求解得到的视电阻率也是合理的。因此,实际处理时可以从早期的第一窗口感应电动势开始计算,并将计算得到的视电阻率作为第二窗口的视电阻率初始估计,再由该初始估计确定第二时窗视电阻率属于感应电动势随电导率变化的上升段还是下降段。一旦确定出求根范围,就可以利用二分法求此范围内的根并作为全区视电阻率。以此类推,可以获得全部时窗的视电阻率。这种做法的依据是电法勘探的体积效应。实际上,从图 1 可以看出,早期的感应电动势在野外常见的电阻率变化范围内为电阻率的单调函数,其解如果存在,计算的视电阻率是合理的。由于体积效应,相邻时间道之间的视电阻率相差不会很大,由此由前一道视电阻率确定下个窗口的视电阻率计算范围。利用该思想已经编制了相应的实用处理程序^①。

4 数值结果

利用上述方法,对位于电阻率为 $100 \Omega \cdot m$ 的均匀半空间上的发射回线及测点分布(图 2a),计算了全区视电阻率,结果见图 2b。从图可见,无论是靠近发射回线边界还是回线中部的测点,计算的全区视电阻率都反映了介质的真电阻率。同时,由于直接求方程的根,对早期时间和晚期时间,都能给出电阻率的真实估计。

图 3 给出了图 2 装置在 H 型断面上的计算结果。H 型模型电阻率分别为 $\rho_1=100 \Omega \cdot m, \rho_2=10 \Omega \cdot m, \rho_3=500 \Omega \cdot m$,对应的层厚度分别是 $h_1=400 m, h_2=50 m$ 。从图可见,尽管测点位置差别造成感应电动势在早期分离,但计算的全区视电阻率完全一样,不受测量位置变化影响,且真实反映了电阻率随深度的变化。

图 4 是采用大定源装置实际观测的感应电动势计算的视电阻率-视深度拟断面图。发射回线宽

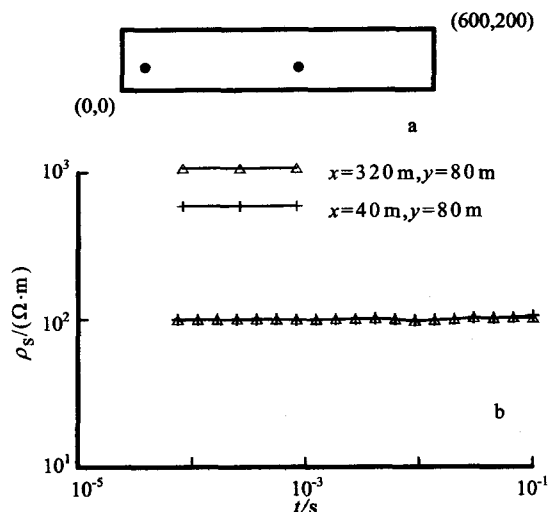


图 2 均匀大地大定源全区视电阻率
Fig. 2 Large loop whole-time apparent resistivity from ε of half space model
a. 装置组合; b. 全区视电阻率曲线

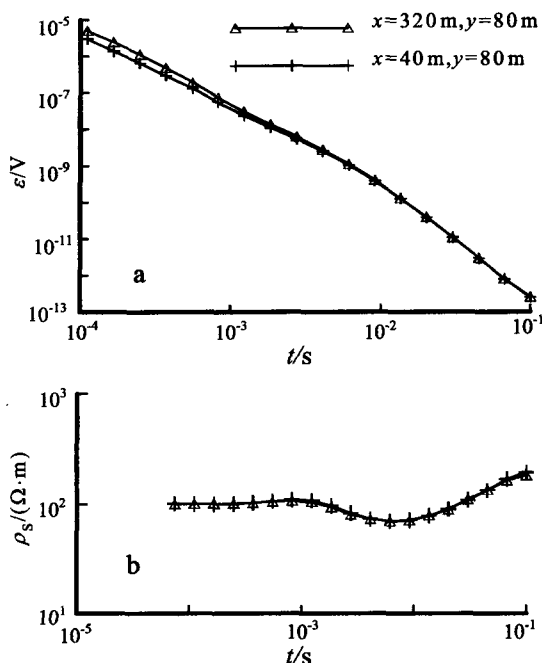


图 3 H 型断面大定源全区视电阻率
Fig. 3 Whole-time apparent resistivity of H-type model
a. 感应电动势; b. 全区视电阻率

① 翁爱华. 电法软件交流网. <http://www.dianfa.com/soft-down.htm>. 2008.

500 m,长 200 m,观测在过回线中心平行长边的测线上进行。第一个测点距短边只有 10 m,点距 10 m,共 49 个测点。最早采样时间为 26 s,最后一个采样点为 25.15 ms。从图可见,计算的视电阻率断面较为合理。

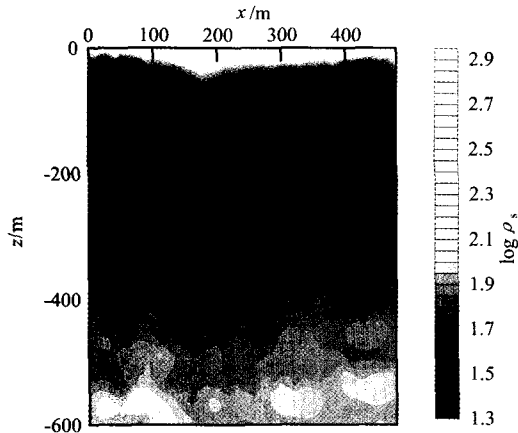


图 4 实际大定源数据全区视电阻率-视深度断面图

Fig. 4 Pseudo-section of whole-time apparent resistivity versus apparent depth of a real case

5 结论

(1)大定源回线垂直磁场感应电动势是电阻率的非单调函数。

(2)结合感应电动势变化规律,利用二分法可以较合理计算出大定源的全区视电阻率。

(3)理论模型和实际数据的计算结果表明,文中的方法策略是可行的,计算结果是合理的。

参考文献(References):

- [1] 殷长春. 频率测深波区视电阻率响应和正演计算[J]. 长春地质学院学报, 1987, 17(3): 331 - 338.
YIN Chang-chun. The response of apparent resistivity of EM sounding in wave area and direct calculation[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1987, 17(3): 331 - 338.
- [2] 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 - 298.
YIN Chang-chun, PIAO Hua-rong. The definition of apparent resistivity in electromagnetic sounding methods[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 1991, 15(4): 290 - 298.
- [3] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- JIANG Bang-yuan. Applied near zone magnetic source transient electromagnetic exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
- [4] 翁爱华, 陆冬华, 刘国兴. 利用连分式定义电偶源瞬变电磁测深垂直磁场分量全区视电阻率研究[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(3): 56 - 58.
WENG Ai-hua, LU Dong-hua, LIU Guo-xing. Definition of whole zone apparent resistivity for transient electromagnetic method of current dipole source [J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(3): 56 - 58.
- [5] 熊彬. 大回线瞬变电磁法全区视电阻率的逆样条插值计算[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2005, 35(4): 515 - 519.
XIONG Bin. Inverse spline interpolation for the calculation of all-time resistivity for the large-loop transient electromagnetic method [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(4): 515 - 519.
- [6] Das U C. Apparent resistivity curves in controlled-source electromagnetic sounding directly reflecting true resistivities in a layered earth [J]. Geophysics, 1995, 60(1): 53 - 60.
- [7] 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.
BAI Deng-hai, Meju M A, LU Jian, et al. Numerical calculation of all-time apparent resistivity for the central loop transient electromagnetic method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(5): 697 - 704.
- [8] 严良俊, 胡文宝, 陈清礼, 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.
YAN Liang-jun, HU Wen-bao, CHEN Qing-li, et al. The estimation and fast inversion of all-time apparent resistivities in long-offset transient electromagnetic sounding [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1999, 34(5): 532 - 538.
- [9] 李建平, 李桐林, 赵雪峰, 等. 层状介质任意形状回线源瞬变电磁全区视电阻率的研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1777 - 1780.
LI Jian-ping, LI Tong-lin, ZHAO Xue-feng, et al. Study on the TEM all-time apparent resistivity of arbitrary shape loop source over the layered medium [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(6): 1777 - 1780.
- [10] 刘国兴. 电法勘探原理与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
LIU Guo-xing. Principles of geoelectricity [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.