

文章编号: 1001-1749(2012)04-0380-04

广域视电阻率的数值计算方法

王顺国^{1,2,3,4}, 熊彬^{2,3,4}

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

2. 有色及贵金属隐伏矿床勘查教育部工程研究中心, 广西 桂林 541004;

3. 广西地质工程中心重点实验室, 广西 桂林 541004;

4. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004;

摘要: 广域视电阻率与卡尼亚视电阻率相比, 能更好地表征地下介质的电性变化规律, 一般常使用迭代法和逆插值法求解, 这里使用这两种算法对 $E-E_x$ 方式广域视电阻率进行了计算。结果表明, 使用这两种算法所得广域视电阻率, 都正确反映了地下介质的电性变化规律, 逆插值的影响因素较少, 计算过程稳定。其不足之处在于要求插值目标函数单调, 迭代法步骤简单, 并存在迭代发散的情况。在实际应用时, 可根据广域视电阻率公式的特点, 选择适当的方法进行计算。

关键词: 广域电磁法; $E-E_x$ 方式广域视电阻率; 迭代法; 逆插值法

中图分类号: P 631.3⁺25 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2012.04.02

0 前言

在电法勘探中, 通过引入适当的视电阻率定义, 使得视电阻率响应曲线比观测的场值更好地反映地下电性界面的存在, 这是地球物理勘探中电法较之于其它方法的独特之处^[1]。然而频率域电磁法中均匀半空间表面电磁场值与电阻率之间存在着复杂的隐函数关系, 难以用解析方法求出电阻率与场之间的显示反函数, 因此通常使用各种近似定义。近似方法在定义条件满足时, 能很好地反映地下介质电性变化, 而在条件不满足时, 则不能如实反映。在实际工作中很难准确判断这些条件满足与否, 这就给解释工作造成困难。国内、外学者为此做了大量研究工作。

殷长春等^[1]根据视电阻率定义的基本原则, 对电磁法中多种视电阻率定义做了比较, 指出全区视电阻率优于近似视电阻率。黄皓平等^[2]提出全波

视电阻率, 在全区同时用电磁场的三个分量来分段定义视电阻率, 使用这种方法定义的视电阻率曲线有显著改善。汤井田等^[3,4]先后提出多种全区视电阻率定义, 均形象地反映了地下介质的变化特征, 其中阻抗实部等效电阻率, 曲线假极值有所压低, E_z 定义的全区视电阻率, 具备频率测深的意义, 且计算简便。毛先进等^[5]提出全区视电阻率的直接算法, 方法简明且精确。Umesh C. Das^[6]计算了水平层状大地上垂直磁偶源频率测深的全波视电阻率, 形象地反映了地电断面电性垂向变化特征。熊彬^[7]给出了一种方便快捷的瞬变电磁全区视电阻率数值计算方法即逆样条插值法, 该方法亦可用于频率域电磁法全频域视电阻率的计算。

何继善^[8,9]提出了新的勘探方法, 即广域电磁法, 该方法不但继承了 CSAMT 使用人工源克服场源随机性的优点, 而且摒弃了 CSAMT 在远区信号微弱的劣势, 可以以较小的收发距获得大的探测深度, 在探测油气和寻找深部金属矿方面, 有明

基金项目: 国家自然科学基金项目(40974077, 41164004); 国家高技术研究发展计划项目(2007AA06Z134); 广西自然科学基金项目(2011GXNSFA018003)

收稿日期: 2011-10-28 改回日期: 2012-03-13

显的优势。其核心内容之一即是定义了广域视电阻率,对观察点到发送源的距离没有任何限制,它适合于广大区域,而不是像 CSAMT 那样只适用于远区。作者在本文对电偶源激励下 E_x 分量定义的广域视电阻率,用迭代法和逆插值法分别进行了计算,并对计算方法和结果做了深入的分析。

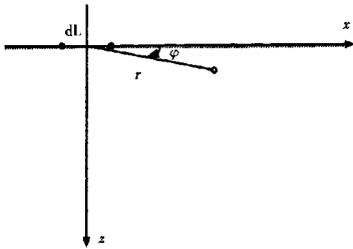


图 1 均匀半空间中坐标系示意

Fig. 1 Coordinate system on homogeneous half-space

1 E-E_x 方式广域视电阻率

如图 1 所示,水平电偶极子位于地表,选取偶极子中心为坐标原点, x 轴与偶极矩方向相同, z 轴垂直向下。略去推导过程,此处直接给出谐波电偶极子在地表时,电场水平分量的表达式^[10,11]。

$$E_x = \frac{Idl\rho}{2\pi r^3} f_{E-E_x}(ikr) \tag{1}$$

这里

$$f_{E-E_x}(ikr) = 3 \cos^2 \varphi - 2 + e^{-\mu r} (1 + ikr) \tag{2}$$

公式(1)、公式(2)中, I 为偶极子源的电流强度; dL 为偶极距; r 为径向矢量 r 的长度; φ 为 x 轴与径向矢量 r 的夹角; μ 为磁导率; ω 为角频率; ρ 为半空间的电阻率; $k = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - i\omega \mu / \rho}$ 为波数; ϵ 为介电常数。

由公式(1)可得 E-E_x 方式广域视电阻率,如公式(3)所示。

$$\rho_a = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{f_{E-E_x}(ikr)} \tag{3}$$

其中 $K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \cdot \overline{MN}}$; $\Delta V_{MN} = E_x \cdot \overline{MN}$ 为测量电压, \overline{MN} 为测量电极间的距离。

2 数值计算方法

2.1 迭代法

迭代法是数值计算中一种经典的方法。其思想是先给出方程根的一个近似值,然后反复用迭代公式校正这个近似值,使之逐步逼近真值,直到满

足给定的精度为止,文中具体做法如下。

(1) 先任取一个电阻率值 ρ_0 , 并代入方程(2), 然后将所求 $f_{E-E_x}(ikr)$ 代入方程(3), 得到新的电阻率值 ρ_1 。

(2) 利用条件 $|(\rho_1 - \rho_0) / \rho_0| < \epsilon$ (ϵ 是期望精度) 进行判断, 满足条件, ρ_1 就是所求值; 不满足条件, 把 ρ_1 赋值给 ρ_0 , 然后重新迭代、判断, 直到满足迭代期望精度 ϵ 为止。

(3) 在求解过程中会得到一系列的 ρ_i , 为迭代序列, 如果迭代序列收敛于某值, 则称迭代收敛, 否则称发散。

2.2 逆插值法

由电偶极子电场水平分量表达式(3)变换得方程(4)。各参数意义均与前述一致。

$$\Delta V_{MN} = C \cdot Z(\rho) \tag{4}$$

其中 $C = \frac{I}{K_{E-E_x}}$ 。而

$$Z(\rho) = \rho f_{E-E_x}(ikr) \tag{5}$$

这里 $Z(\rho)$ 是所求插值目标函数。

在实际工作中, ΔV_{MN} 通过测量得到, 而 C 为常数, ρ 的具体求取步骤为: ΔV_{MN} 已知, ①首先由方程(4)计算出函数值 $Z(\rho_0)$; ②然后根据方程(5)建立 ρ 与函数 $Z(\rho)$ 的列表关系, 文中 $\rho \in (10^{-6}, 10^6) \Omega \cdot m$, 以对数等间隔取 121 个值; ③最后利用列表关系, 对函数值 $Z(\rho_0)$ 进行逆向插值, 得到 ρ_0 的值。此处的 ρ_0 即是计算 $Z(\rho_0)$ 的电场值所对应的电阻率。

需注意的是, 逆插值法是一种反插值, 如果不能在插值区间上保证插值函数严格单调, 插值结果就会出现错误^[7,11,12]。作者验证了方程(5)所示函数的单调性, 见图 2。

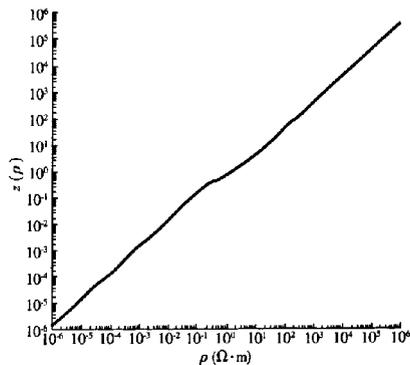


图 2 插值目标函数单调性

Fig. 2 The monotonicity of interpolation function

3 计算分析

3.1 测深曲线

在模型计算中,偶极距 $dL = 1\ 500\ \text{m}$,收发距 $r = 4\ 000\ \text{m}$,层厚 $h_i = 200\ \text{m}(i = 1, 2, 3)$,夹角 φ 满足 $\tan\varphi = 0.5$,电流 $I = 1\ \text{A}$,频率 $f_{\min} = 10^{-2}\ \text{Hz}$, $f_{\max} = 10^4\ \text{Hz}$,个数为 60,且均不变。

图 3 和图 4 是两层模型的计算结果,均较真实地反映了模型。图 5 和图 6 是三层模型的计算结果,第二层介质的视电阻率都低于介质真电阻率,K 型曲线的这一特征尤为明显。图 7 和图 8 是四层模型的计算结果,第一层及第四层介质的视电阻率与真电阻率吻合,第二层及第三层介质的视电阻率低于介质真电阻率,高层阻尤为明显,这与电磁法对高阻分辨能力较差的事实吻合^[3,14]。在上述各图中,逆插值法和迭代法计算所得 $E-E_x$ 方式广域视电阻率曲线非常相近,基本反映了模型介质的真实情况,可见广域视电阻率可以在包括过波带在内的广大区域使用,不像卡尼亚视电阻率会出现近区畸变。

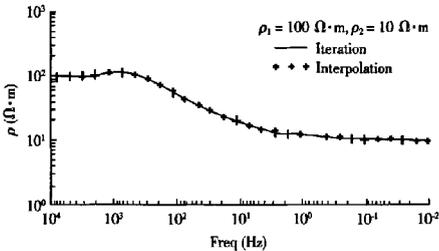


图 3 D 型测深曲线对比

Fig. 3 The comparison of D type model

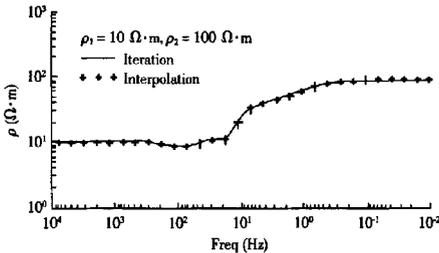


图 4 G 型测深曲线对比

Fig. 4 The comparison of the G type model

3.2 计算时间

为了比较两种方法的计算速度和稳定性,作者用计算机(处理器 Intel(R) Core(TM) Duo CPU E7300)统计了 3.1 章节中各类型曲线的计算时

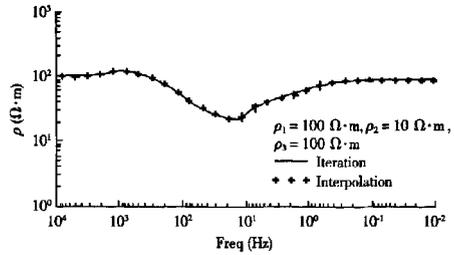


图 5 H 型测深曲线对比

Fig. 5 The comparison of the H type model

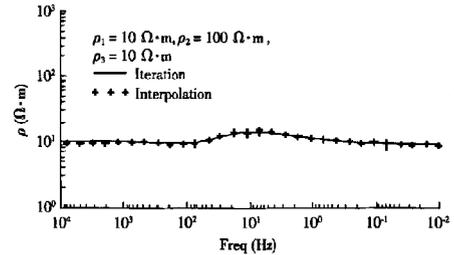


图 6 K 型测深曲线对比

Fig. 6 The comparison of the K type model

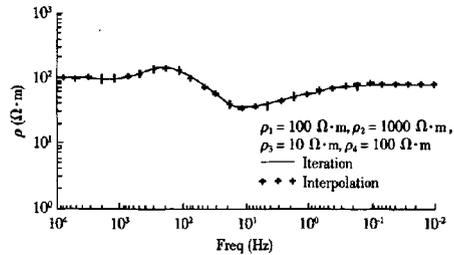


图 7 KH 型测深曲线对比

Fig. 7 The comparison of the KH type model

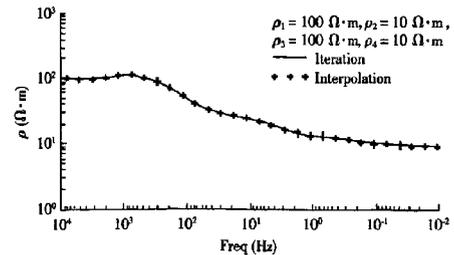


图 8 HK 型测深曲线对比

Fig. 8 The comparison of the HK type model

间。为了使对比效果明显,记录的是计算 11 个测点,每个测点 60 个频点的总时间。从表 1 可以看出,二者的计算时间相差不大,所以计算速度相当,

但迭代时间序列的极差与均方差均大于逆插值时间序列,说明逆插值过程相对迭代过程要稳定。

表 1 迭代法与逆插值法计算时间对比

Tab. 1 Computation time comparison of iteration and inverse interpolation algorithms

曲线类型	迭代时间(s)	逆插值时间(s)
D 型	3. 328125	3. 406250
G 型	3. 406250	3. 421875
H 型	3. 421875	3. 437500
K 型	3. 421875	3. 437500
KH 型	3. 515625	3. 500000
HK 型	3. 515625	3. 500000
极差	0. 187500	0. 093750
均方差	0. 065312	0. 036551

3.3 存在问题

迭代法受迭代初值、迭代期望精度、迭代次数上限,以及迭代公式收敛性的影响。迭代初值选取的越接近真值,迭代收敛速度就越快。采用远区近似表达式的计算结果作为迭代初值,是比较理想的选择。迭代期望精度不易过小,否则迭代会因达到次数上限而终止,作者在文中取 $\epsilon = 0.5 \times 10^{-2}$ 就能保证精度要求。迭代次数上限的选取也不宜过大,迭代结果在迭代进行若干次后,将不再明显的提高精度。与上述各因素相比,迭代公式的收敛性是迭代法存在的最大问题,如果迭代发散,迭代结果无法逼近真值,此时,要进行必要的处理,首选修正迭代步长 $\Delta\rho_0$,使得

$$\Delta\rho_1 = \Delta\rho_0/2 \quad (6)$$

这里 $\Delta\rho_1$ 即为新的步长,新步长可使迭代过程趋于稳定。另外,也可修正或变换迭代公式,以使迭代收敛,但结果并不一定理想。

逆插值法主要受插值算法、插值区间和插值目标函数单调性的影响。通常插值算法选用三次样条,这样就保证了精度要求。插值区间可根据岩石电阻率的变化范围进行设定,如取文中的 $\rho \in (10^{-6}, 10^6)\Omega \cdot \text{m}$ 。与上述因素相比,插值目标函数单调性是逆插值法存在的最大问题,若不能保证插值目标函数严格单调,一个电磁场值将对应多个 ρ 值,逆插值结果就会出现错误。所以在具体计算时,首先要对插值目标函数的单调性进行检验。对于非单调目标函数 $f(\rho)$,可以引入转折点 ρ^0 ,使得在转折点划分的各插值区域中 $f(\rho)$ 是单调的,然后逐段实施逆插值。

4 结论与建议

(1)广域视电阻率没有忽略任何项,因而,广域视电阻率可以在包括过渡带在内的广大区域使用,大大拓展了人工源电磁法的观测范围。

(2)用逆插值法和迭代法计算的 $E-E_x$ 方式广域视电阻率,都正确反映了地下介质的电性变化规律,所得视电阻率曲线相似。

(3)逆插值法的影响因素相对较少,且易控制,所以计算过程稳定,但需要检验和处理目标函数单调性问题。

(4)迭代法具体实施相对简单,但存在不稳定性,当迭代发散时,要对迭代步长或迭代函数进行校正。

(5)除 $E-E_x$ 方式广域视电阻率,广域视电阻率还有多种定义方式,所以在实际计算时,要根据表达式的特点,选择合适的方法。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 黄皓平,朴化荣. 水平多层大地上垂直磁偶极频率测深的全波视电阻率[J]. 地球物理学报,1992,35(3):389.
- [3] 汤井田,何继善. 水平电偶源频率域全区视电阻率的新方法[J]. 地球物理学报,1994,37(4):543.
- [4] 汤井田,周聪,张林成. CSAMT 电场 y 方向视电阻率的定义与研究[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2011,41(2):552.
- [5] 毛先进,鲍光淑. 水平电偶源频率域电磁测深全区视电阻率的直接算法[J]. 中南工业大学学报,1996,27(3):253.
- [6] UEMSH C. Das. Apparent resistivity curves in controlled-source electromagnetic sounding directly reflecting true resistivities in a layered earth[J]. Geophysics, 1995, 60(1):53.
- [7] 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.
- [8] 何继善. 广域电磁测深法研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2010,41(3):1065.
- [9] 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.
- [10] A. A. 考夫曼, G. V. 凯勒. 频率域和时间域电磁测深[M]. 北京:地质出版社,1987.
- [11] 佟铁钢,刘春明,何继善. CSAMT 全区电阻率法数值模拟及应用探讨[J]. 地球物理学进展,2009,24(5):1855.
- [12] 王尊正. 数值分析基本教程[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1993.
- [13] 何继善. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1990.
- [14] 汤井田,何继善. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙:中南大学出版社,2005.

作者简介:王顺国(1987-),男,甘肃兰州人,硕士,主要从事电磁法数值模拟及反演成像方面的研究。

广域视电阻率的数值计算方法

作者: 王顺国, 熊彬

作者单位: 王顺国(中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙410083; 有色及贵金属隐伏矿床勘查教育部工程研究中心, 广西桂林541004; 广西地质工程中心重点实验室, 广西桂林541004; 桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林541004), 熊彬(有色及贵金属隐伏矿床勘查教育部工程研究中心, 广西桂林541004; 广西地质工程中心重点实验室, 广西桂林541004; 桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林541004)

刊名: 物探化探计算技术 **ISTIC**

英文刊名: Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration

年, 卷(期): 2012, 34(4)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wthtjsjs201204002.aspx