

doi: 10.11720/wtyht.2015.3.22

万伟,唐新功.CSAMT 中 E_x 视电阻率与 E_x/H_y 比值视电阻率的对比[J].物探与化探,2015,39(3):567-571.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.3.22

Wan W, Tang X G.Comparative analysis E_x apparent resistivity and E_x/H_y ratio apparent resistivity in CSAMT[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2015,39(3):567-571.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.3.22

CSAMT 中 E_x 视电阻率与 E_x/H_y 比值视电阻率的对比

万伟^{1,2},唐新功^{1,2}

(1.油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学),湖北 武汉 430100; 2.长江大学 地球物理与石油资源学院,湖北 武汉 430100)

摘要: 常规 CSAMT 勘探是利用电场与磁场的比值来计算卡尼亚视电阻率。通过均匀半空间及层状介质模型,对 CSAMT 各场分量进行了计算,对视电阻率定义方式进行了分析。研究表明:采用电场 E_x 单分量定义的视电阻率,可以减轻比值视电阻率近区畸变严重的问题。实测资料分析结果进一步验证了 E_x 分量视电阻率的这一优点。在野外 CSAMT 资料采集时不必拘泥比值视电阻率这一种定义方式,可以根据野外实际条件灵活地调整采集方式,提高工作质量和效率。

关键词: CSAMT; 电场 E_x 分量; E_x/H_y 比值视电阻率; 卡尼亚视电阻率; 水平层状介质模型; 近区畸变

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2015)03-0567-05

在可控源音频大地电磁法(CSAMT)中,目前仍广泛采用比值电阻率定义,即通过测量两个相互正交的电场(E_x)和磁场(H_y)来得到视电阻率。比值视电阻率的优点是计算简便,在波区能较客观地反映地电断面的垂向变化,然而在非波区会产生严重畸变,影响测深曲线的解释^[1-3];其次,由于通常多个电道共用一个磁道,一旦磁道的数据丢失,或测量出现偏差,或噪声严重,会影响多个测点卡尼亚视电阻率的使用^[4,5]。虽然工作时可在不影响信号质量的前提下尽可能地增大收发距,但部分频点仍然不可避免地会进入近区,导致曲线畸变,造成资料解释不准确。许多学者基于这个原因,一方面研究针对近区畸变校正的全区视电阻率法^[1,6,7],另一方面开始研究比值视电阻率之外的单分量视电阻率定义方法。林长佑等^[8]研究分析了电场和磁场中三种单分量视电阻率—相位联合反演方法,并论述了实际应用的效果;汤井田等^[9]探讨了 CSAMT 电场 y 方向定义的视电阻率具有计算简单、改善近区畸变的优点;邱卫忠等^[10]运用实测资料分析了 CSAMT 标量观测中各分量的特征,认为单分量视电阻率与比值视电阻率在纵向上具有相同的分辨率;陈明生等^[11]

认为在电偶源频率电磁测深中的 E_x 分量定义视电阻率分辨率强于比值视电阻率。这些学者从不同的角度积极探索了不同视电阻率的定义方式。笔者将从场分量的特点出发来讨论不同视电阻率的定义方式的差别。

通过半空间中电偶源激发的各个电磁场分量在近区和远区的近似表达式^[12-14]不难发现:在远区,相对于 E_z 、 H_x 、 H_y 分量, E_x 、 E_y 、 H_z 分量与地层电性关系更为密切,但是 H_z 分量衰减相对更快,且在采集过程中易受干扰;在近区,除 E_x 、 E_y 外,其余分量均不反映地下电性信息。所以,在实际测量时,采集 E_x 和 E_y 两个分量较为有利。考虑到 CSAMT 野外经常采用的是赤道偶极装置进行标量观测,此次仅对层状介质模型中电偶源频率测深中的 E_x 分量定义的视电阻率与比值视电阻率定义进行对比研究。

1 CSAMT 场分量及视电阻率定义

视电阻率是空间中介质真电阻率的复杂加权平均,一般通过均匀半空间场等效复杂地电模型场的方式来定义。在准静态极限下,水平谐变电偶极源在均匀半空间表面产生的电磁场分量为^[13]

收稿日期: 2014-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41274115,41274082,41404087);国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2013CB228605);中石油创新基金项目(2013D-5006-0302)

$$E_x = \frac{\rho P_E}{2\pi r^2} [e^{ikr} (1 - ikr) + (3\cos^2\theta - 2)] \quad (1)$$

$$H_y = \frac{\rho P_E}{2\pi r^2} I_1 K_1 + \frac{i P_E}{8\pi r \sqrt{\frac{i\mu_0 \omega}{\rho}}} \{ (\cos 2\theta - 1) [I_0 K_1 - I_1 K_0] \} \quad (2)$$

式中： r 为收-发距， θ 为观测点与偶极源连线方向夹角（如图 1 所示）， P_E 为电偶极矩， k 为波数， ρ 为半空间中的电阻率， I_0 、 I_1 、 K_0 、 K_1 为以 $-ikr/2$ 为虚宗量的第一类、第二类贝塞尔函数。

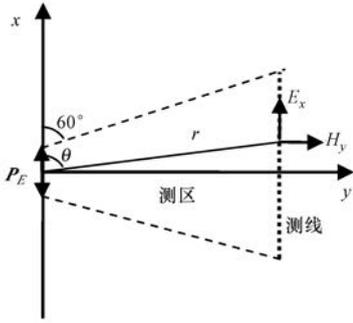


图 1 电偶源及场分量示意

CSAMT 观测区域一般限制在如图 1 所示的梯形或扇形测区内。电偶极源激发的电磁场由两部分组成：一部分在地面传播，并折射穿到地下，当 $|kr| \ll 1$ 时，这部分波影响较小，可以忽略；另一部分直接从地中传播过去并按指数衰减，当 $|kr| \gg 1$ 时，进入远区，可将电磁波视为平面波。当介质由均匀半空间变为层状介质时，对应的式(1)、(2)改写为

$$E_x = \frac{P_E}{2\pi} (i\omega\mu_0) \left[\int_0^\infty \frac{m}{m+m_1/R^*} J_0(mr) dm + \frac{1}{r} \int_0^\infty \left(\frac{m_1}{k_1^2 R} - \frac{1}{m+m_1/R^*} \right) J_1(mr) dm \right] \sin^2\theta + \frac{P_E}{2\pi} (i\omega\mu_0) \left[\int_0^\infty \frac{mm_1}{k_1^2 R} J_0(mr) dm - \frac{1}{r} \int_0^\infty \left(\frac{m_1}{k_1^2 R} - \frac{1}{m+m_1/R^*} \right) J_1(mr) dm \right] \cos^2\theta, \quad (3)$$

$$H_y = \frac{P_E}{2\pi} \left[\int_0^\infty \frac{m_1}{R^*} \frac{m}{m+m_1/R^*} J_0(mr) dm - \frac{1}{r} \int_0^\infty \frac{m}{m+m_1/R^*} J_1(mr) dm \right] \sin^2\theta + \frac{P_E}{2\pi} \left[\frac{1}{r} \int_0^\infty \frac{m}{m+m_1/R^*} J_1(mr) dm \right] \cos^2\theta; \quad (4)$$

$$R^* = \coth \left[m_1 H_1 + \operatorname{arccoth} \frac{m_1}{m_2} \cdot \coth \left(m_2 H_2 + \dots + \operatorname{arccoth} \frac{m_{N-1}}{m_N} \right) \right], \quad R_N^* = 1, \quad (5)$$

$$R = \coth \left[m_1 H_1 + \operatorname{arccoth} \frac{m_1 \rho_1}{m_2 \rho_2} \cdot \coth \left(m_2 H_2 + \dots + \operatorname{arccoth} \frac{m_{N-1} \rho_{N-1}}{m_N \rho_N} \right) \right], \quad R_N = 1. \quad (6)$$

式中： $m_i = \sqrt{m^2 + k_i^2}$ ， m 的物理意义是空间频率，具有距离倒数的量纲， $k_i^2 = -i\omega\mu/\rho_i$ ； R 、 R^* 为电性参数。

当 $|kr| \gg 1$ 时，有如下近似关系

$$E_{xp} = \frac{\rho P_E}{2\pi r^3} (3\cos^2\theta - 2), \quad (7)$$

$$H_{yp} = (1 + i) \frac{P_E}{4\pi r^3} \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} (3\cos^2\theta - 2). \quad (8)$$

E_{xp} 、 H_{yp} 可视为均匀半空间中的平面波场。

计算层状介质的平面波场，只需将半空间中平面波场公式乘上一个与地层有关的因子。当场强与 ρ 成正比时，乘上 $1/G_0^2$ (G_0 为地层因子)，当场强与 $\sqrt{\rho}$ 成正比时，乘上 $1/G_0^{[14]}$ 。对于两层介质，有

$$G_0(\rho_1, \rho_2, h_1) = \frac{(\sqrt{1/\rho_1} + \sqrt{1/\rho_2}) - (\sqrt{1/\rho_1} - \sqrt{1/\rho_2}) e^{2ik_1 h_1}}{(\sqrt{1/\rho_1} + \sqrt{1/\rho_2}) + (\sqrt{1/\rho_1} - \sqrt{1/\rho_2}) e^{2ik_1 h_1}}, \quad (9)$$

ρ_1 与 ρ_2 分别为第一、二层的电阻率， h_1 为第一层的厚度。对于层介质，只需要将 $\sqrt{1/\rho_{n-1}}$ 变成 $\sqrt{1/\rho_{n-1} G_0(\sigma_{n-1}, \sigma_n, h_{n-1})}$ ，再代入式(9)即可递推得到。显然对于均匀半空间有 $G_0 = 1$ 。

由式(7)、(8)可分别得到各场分量及对应比值视电阻率(卡尼亚视电阻率)的定义式

$$\rho^{|E_x|} = \frac{2\pi r^3}{P_E (1 - 3\sin^2\theta)} |E_x|, \quad (10)$$

$$\rho^{|H_y|} = 4\omega\mu_0 \left[\frac{\pi r^3}{P_E (3\cos^2\theta - 2)} \right]^2 |H_y|^2, \quad (11)$$

$$\rho \left| \frac{E_x}{H_y} \right| = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2. \quad (12)$$

2 E_x 分量及视电阻率计算结果分析

赤道偶极装置 ($\theta = \pi/2$) 是 CSAMT 最常采用的测量方式。均匀半空间作为最简单的模型，可以直观地反映出各视电阻率定义方法的优劣。图 2a 分别为均匀半空间 ($\rho = 100 \Omega \cdot m$) 中各视电阻率随频率变化的曲线，图 2b 为各视电阻率值相对真电阻率的偏差 δ 。为了方便比较，均使用对数刻度计算，计算式定义为

$$\delta = \left| \frac{\lg(F_f) - \lg(F)}{\lg(F)} \right| \times 100\%, \quad (13)$$

式中， F 表示真电阻率或平面波场幅值， F_f 表示各

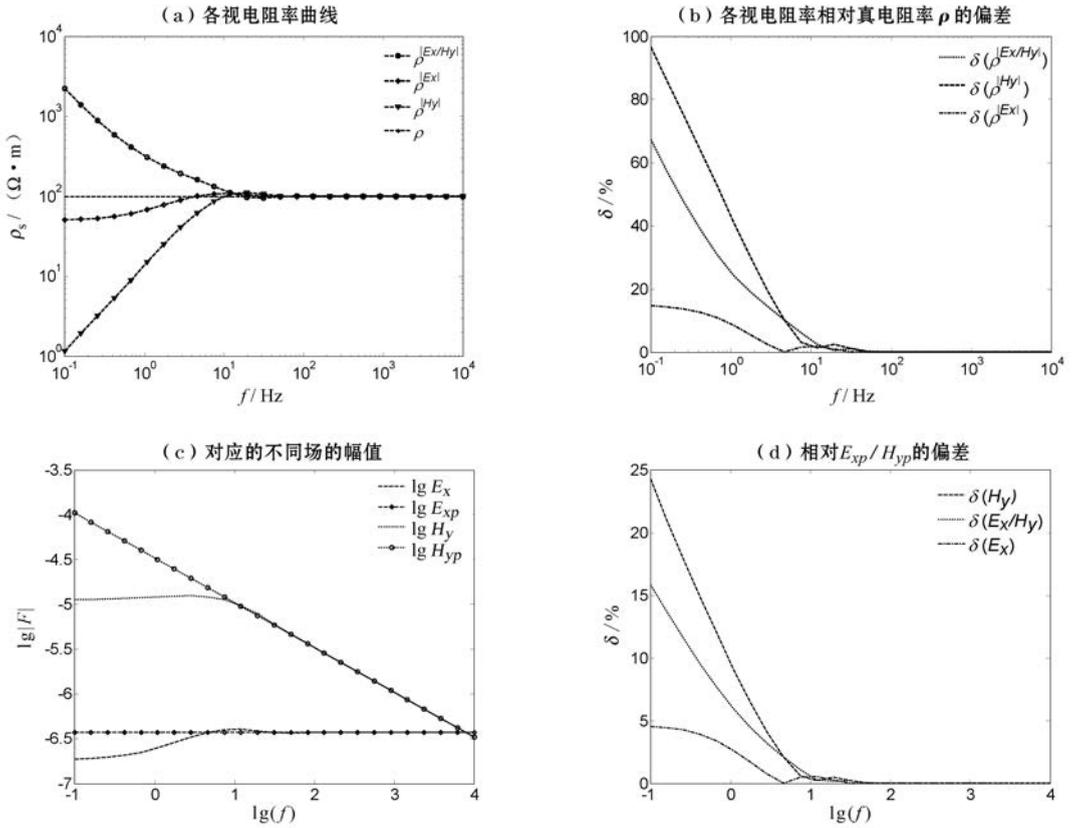


图 2 固定收发距下均匀半空间各视电阻率曲线及其分析结果

视电阻率或全区场幅值。由图 2a、b 可以看出,由磁场分量 H_y 定义的视电阻率偏差最大,其次是卡尼亚阻抗视电阻率,偏差最小的是用电场 E_x 定义的视电阻率。视电阻率曲线的形态与场分量直接相关,可从场的幅值随频率的变化来探讨其对视电阻率曲线形态的影响。

CSAMT 视电阻率的定义是基于平面波的假设,而在收发距 r 一定时,电偶极源产生的电磁波在低频段通常并不是平面波而导致计算的比值视电阻率发生畸变。图 2c 给出了对数坐标系中平面波场与非平面波场的电场与磁场幅值随频率的变化规律,

可以看出磁场幅值变化跨度远大于电场,使得在计算阻抗视电阻率时磁场的影占有较大的比重;在图 2d 中,磁场偏离平面波场的幅度也远大于电场,进一步导致阻抗(E_x/H_y)的偏离。

综合分析图 2 可见,比值视电阻率在近区发生严重的畸变与磁场分量密切相关,虽然电场与磁场都有非平面波效应,但磁场的影比电场大得多,继而影响到比值视电阻率的形态。基于这个原因,在实际测量时,可以考虑不使用磁场分量,这样做一方面可以在一定程度上降低近场效应的影响,提高数据资料的可利用率,另一方面也能减少野外工作量,

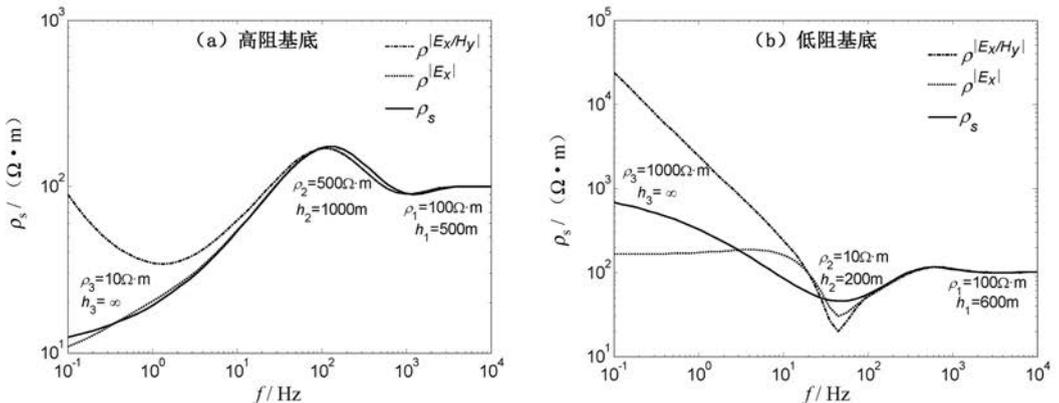


图 3 三层介质中的各视电阻率曲线

降低成本,提高工作效率。

下面继续以水平层状介质模型来验证 E_x 分量定义视电阻率的优点。图 3 为三层介质中 E_x 分量视电阻率、比值视电阻率及平面波场视电阻率(ρ_s)的对比,分别计算了基底为高阻和基底为低阻情况下的各视电阻率。由图可见,以 ρ_s 为参考,在低频段(近区),在各模型中 E_x 视电阻率均优于比值视电阻率,即 E_x 视电阻率比值视电阻率在近区发生严重畸变的情况要轻得多。这种情况对于基底为低阻模型时优势更为明显, E_x 视电阻率整体形态上更加接近于平面波场视电阻率。所以层状模型的计算结果说明了 E_x 分量定义的视电阻率相对比值视电阻率有减轻近区畸变的优点。

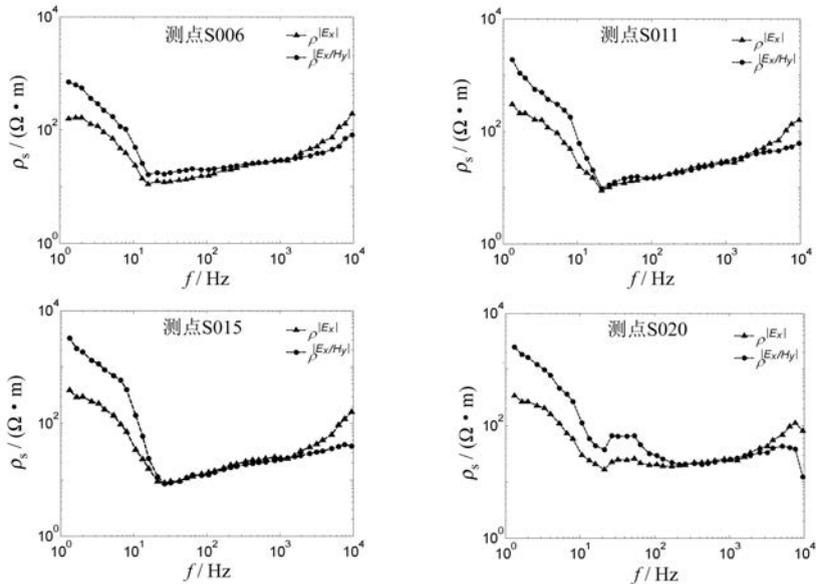


图 4 帽帽山地区 CSAMT 测量 L1 线部分测点的 $\rho^{|E_x|}$ 与 $\rho^{|E_x/H_y|}$ 曲线

4 结论

传统的 CSAMT 阻抗视电阻率曲线在近区畸变严重,较大程度上是受到磁场 H_y 分量的影响,因此在数据采集时可以考虑放弃测量或放弃使用磁场 H_y 分量,即单独采集 E_x 分量。均匀半空间和层状模型的计算结果表明,用 E_x 分量定义的视电阻率比值视电阻率的近区畸变程度小,曲线形态更加接近平面波场视电阻率,能够更准确地反映地下介质的电性变化。野外实测资料的计算也表明了这一点。使用 E_x 分量定义的视电阻率突出的优点是使得野外数据采集可以仅观测一个电场分量,从而大大减少野外工作量,降低成本,提高工作效率。

参考文献:

3 实测资料验证

以山西大同帽帽山地区 2013 年 CSAMT 的 L1 线实测资料为例。野外采集方式如图 1 所示,通过实测的电场 E_x 和磁场 H_y 分量计算了由电场 E_x 和比值定义的两种视电阻率,图 4 给出了部分测点的计算结果。图中显示,相对阻抗比值视电阻率,电场 E_x 定义的视电阻率均有改善近区畸变的效果。

实测资料的计算结果进一步说明,在改善近区畸变方面,电场 E_x 定义视电阻率要优于比值视电阻率。因而,在野外实际工作时可以只采集一个电场分量,这样可以大大减少野外工作量,提高工作效率。

- [1] 汤井田,何继善.水平电偶源频率测深中全区视电阻率定义的新方法[J].地球物理学报,1994,37(4):543-552.
- [2] 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.
- [3] 林威.CSAMT 法过渡区电磁场的特征[J].物探与化探,2009,33(2):148-150
- [4] 王坤坤,廖全涛.高压线对 CSAMT 探测结果的影响及数据处理[J].物探与化探,2014,38(5):1051-1054.
- [5] 杨建军,钟仁.CSAMT 中磁探头摆放位置对卡尼亚视电阻率的影响[J].物探与化探,2013,37(3):521-523.
- [6] 毛先近,鲍光淑.水平电偶源频率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):253-256.
- [7] 詹少全,钱美平,冯戈戈. CSAMT 全区视电阻率电场正演迭代拟合近场校正方法[J].物探与化探,2011,35(5):663-665.
- [8] 林长佑,武玉霞,罗东山,等.频率测深中单分量视电阻率—相位联合反演[J].煤田地质与勘探,1993,21(3):46-52.
- [9] 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):552-558.

- [10] 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.
- [11] 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: 60 - 66.
- [12] 朴华荣. 电磁法测深原理[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [13] 底青云, 王若. 可控源音频大地电磁数据正反演及方法应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 9 - 27.
- [14] 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 10 - 12.

A comparative analysis of E_x apparent resistivity and E_x/H_y ratio apparent resistivity in CSAMT

WAN Wei^{1,2}, TANG Xin-Gong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. Department of Geophysics and Petroleum Resource, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: Currently, the adoption of the ratio of electric field and magnetic field to calculate the Cagniard resistivity is widely used in traditional CSAMT exploration. However, an analysis of the electromagnetic field components and the apparent resistivity definition method in homogeneous half space and layered media indicates that the apparent resistivity defined by electric field E_x component can improve the problem of the near zone distortion of ratio apparent resistivity. Moreover, the advantage of apparent resistivity defined E_x component has been further verified by the measured field data. Therefore it's not necessary to rigidly stick to using the ratio apparent resistivity in the field CSAMT data acquisition, and the acquisition mode flexibility can be adjusted according to actual conditions so as to improve work quality and efficiency.

Key words: CSAMT; electric field component E_x ; E_x/H_y ratio apparent resistivity; comparison; Cagniard resistivity; horizontal layered media model; near zone distortion

作者简介: 万伟(1989-), 男, 硕士研究生在读, 研究方向为 CSAMT 正反演。E-mail: beyondwanwei@163.com

通讯作者: 唐新功(1968-), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: tangxg@yangtzeu.edu.cn

上接 566 页

The application of a new mesh generation method for finite difference to MT 1D inversion

ZHANG Hui^{1,2}, TANG Xin-Gong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. Department of Geophysics and Petroleum Resource, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: This paper describes the application of finite difference algorithms in MT method, deduces the algorithms of 1D layered and continuous medium, and proposes a new mesh generation method. Meanwhile, with two-layer or three-layer medium model inversion calculation, the paper demonstrates the correctness of the algorithms and rationality of the grid subdivision method. The authors also designed a kind of continuous medium and made a comparison of the inversion result between two kinds of multiple layered medium models which have different layer approximations, and indicated the necessity of continuous medium model inversion research. For continuous medium model, the fine the grid, the better the approach result. Nevertheless, with the gradual decreasing of the error, the improvement of accuracy becomes not so distinct. However, resource and time consumption will dramatically increase. So decreasing grid spacing without restriction is not necessary. What's more, taking both the error and grid spacing into consideration, the authors conducted second difference calculation in first mesh generation and achieved a new conclusion, which can distinctly improve the calculation result.

Key words: finite difference; MT; 1D inversion; continuous medium; new mesh generation method

作者简介: 张辉(1988-), 男, 长江大学在读硕士研究生, 研究方向为电磁勘探。E-mail: xxx.zhanghui@qq.com

通讯作者: 唐新功(1968-), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: tangxg@yangtzeu.edu.cn