

doi: 10.11720/wyht.2020.1168

张超,陈大磊,王阳,等.层状介质下张量 CSAMT 最小收发距研究[J].物探与化探,2020,44(1):156-164.http://doi.org/10.11720/wyht.2020.1168

Zhang C, Chen D L, Wang Y, et al. Research on minimum transmit-receive distance of tensor CSAMT in layered media[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 156-164. http://doi.org/10.11720/wyht.2020.1168

# 层状介质下张量 CSAMT 最小收发距研究

张超<sup>1,2</sup>, 陈大磊<sup>1,2</sup>, 王阳<sup>1,2</sup>, 王洪军<sup>1,2</sup>

(1. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 2. 山东省地质勘查工程技术研究中心, 山东 济南 250013)

**摘要:**可控源音频大地电磁法按照观测方式可分为标量 CSAMT 与张量 CSAMT。由于施工方式与电阻率计算方法的差别,标量 CSAMT 中划分远区的最小收发距已不能精确地适用于张量 CSAMT。因此,根据张量视电阻率与大地电磁视电阻率相对误差,分别计算了均匀大地模型、两层模型下的相对误差,并精确给出不同误差限下的最小收发距。结果表明对于两层模型来说,当首层厚度小于 3 倍趋肤深度时,不能直接应用均匀半空间的结果,对于 G 型模型引起误差较大。对于多层结果可由二层模型使用等效电阻率近似估计。研究结果对张量 CSAMT 野外施工有一定的意义。

**关键词:**张量 CSAMT;相对误差;最小收发距

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2020)01-0156-09

## 0 引言

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是一种广泛应用于矿产勘查、地热和地下水工程以及环境勘探等领域的人工源电磁勘探方法,按照观测方式可分为标量 CSAMT 与张量 CSAMT<sup>[1-6]</sup>。不同于标量 CSAMT 单一赤道偶极测量方式,张量 CSAMT 使用的是两个方向的多偶极源,测量 5 个电磁场分量( $E_x, H_y, E_y, H_x, H_z$ ),并计算张量视电阻率用于数据处理解释。在面对复杂地质结构探测的时候有着标量测量无法比拟的优势<sup>[7-9]</sup>。然而,张量 CSAMT 的测量装置与施工方法同标量 CSAMT 相比有很大的不同,其方法与理论研究亟需探讨<sup>[2,10-12]</sup>。

近场效应是 CSAMT 观测中常见的现象<sup>[13]</sup>。由于 CSAMT 沿用大地电磁法(Magnetotelluric, MT)中的卡尼亚视电阻率定义方法,而 MT 使用的天然电磁场为平面波,人工源在非远区所产生的电磁场为非平面波,已不满足电场与磁场的正交条件,因此在近区与过渡区的视电阻率会产生畸变,大大降低

CSAMT 的探测精度。诸多学者对近场效应进行了一系列研究,给出了电阻率近区校正、全区视电阻率定义等方法,取得了一定的效果<sup>[14-16]</sup>。但就实际应用来说,尽量保证在远区场进行观测依然是目前最有效的方法。然而人工源电磁信号随收发距增大,迅速降低,一味地采用较大收发距保证远区观测,会降低人工源的信号强度优势,不利于大深度探测。因此研究满足远区条件的最小收发距具有实际意义。

国内外学者对 CSAMT 最小收发距的选择进行了大量相关研究,并给出相应的波区划分方法。如按照地层波与地面波比值、视电阻率响应误差、电磁场相位等<sup>[17-19]</sup>。目前来看,视电阻率响应误差是最有效的场区划分方法之一<sup>[20-25]</sup>。然而,以往的所采用划分方法中使用的是适用于标量测量的卡尼亚视电阻率,而对张量测量的张量视电阻率鲜有研究。同时,大多数的场区划分方法与最小收发距选定都依赖于较为简易的均匀半空间模型,与实际应用存在较大的差别。

文中基于张量 CSAMT 层状大地模型正演,使

收稿日期: 2019-03-27; 修回日期: 2019-11-05

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目“深部探测综合地球物理技术”(2018CXGC1601)

作者简介: 张超(1986-),男,山东济南人,工程师,主要从事深部成矿应用与海洋勘探工作。Email:510244124@qq.com

用张量视电阻率概念,结合了十字源施工方式,给出其不同误差限下的最小收发距选取依据。首先给出了均匀半空间模型下,张量 CSAMT 与 MT 视电阻率平面误差分布,并给出了其有效施工区域内不同误差限下的最小收发距;随后通过 G 型与 D 型模型,研究响应误差随层厚的变化,对比其与均匀半空间模型的异同,并解释误差变化的物理机制;最后在两个数量级内分别改变首层层厚( $h_1/\delta$ ,  $\delta$  为趋肤深度)与两层介质的电阻率比值( $\rho_1/\rho_2$ ),通过大量的数值模拟工作,给出了常见两层模型不同误差限下的最小收发距。多层模型最小收发距可由两层模型近似获得。

## 1 张量 CSAMT 基本原理

标量 CSAMT 使用单一赤道偶极装置,只需测量电磁场的  $E_x$ 、 $H_y$  或  $E_y$ 、 $H_x$  分量,分别求取比值,即可获得相应的卡尼亚视电阻率<sup>[4]</sup>。

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2, \quad (1)$$

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2. \quad (2)$$

张量 CSAMT 使用一组正交的电偶极子交替发射,分别测量两个场源的  $E_x$ 、 $E_y$ 、 $H_x$ 、 $H_y$ 、 $H_z$  5 个分量。张量阻抗要素与电磁场 6 个分量之间的关系为<sup>[5]</sup>:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} & Z_{xz} \\ Z_{yx} & Z_{yy} & Z_{yz} \\ Z_{zx} & Z_{zy} & Z_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

$$E_r = \frac{IdL}{2\pi} \cos\varphi \left[ \frac{i\omega\mu}{r} \int_0^\infty \frac{1}{m + \frac{m_1}{R^*}} J_1(mr) dm - \rho_1 \int_0^\infty \frac{mm_1}{R} J_0(mr) dm + \frac{\rho_1}{r} \int_0^\infty \frac{m_1}{R} J_0(mr) dm \right], \quad (6)$$

$$E_\varphi = \frac{IdL}{2\pi} \sin\varphi \left[ \frac{\rho_1}{r} \int_0^\infty \frac{m_1}{R} J_1(mr) dm - i\omega\mu \int_0^\infty \frac{m}{m + \frac{m_1}{R^*}} J_0(mr) dm + \frac{i\omega\mu}{r} \int_0^\infty \frac{1}{m + \frac{m_1}{R^*}} J_1(mr) dm \right], \quad (7)$$

$$H_r = \frac{IdL}{2\pi} \sin\varphi \left[ \int_0^\infty \frac{m}{m + \frac{m_1}{R^*}} J_1(mr) dm + r \int_0^\infty \frac{m_1}{R^*} \frac{m}{m + \frac{m_1}{R^*}} J_0(mr) dm \right], \quad (8)$$

$$H_\varphi = \frac{IdL}{2\pi} \cos\varphi \int_0^\infty \frac{m}{m + \frac{m_1}{R^*}} J_1(mr) dm, \quad (9)$$

$$H_z = \frac{IdL}{2\pi} \sin\varphi \int_0^\infty \frac{m^2}{m + \frac{m_1}{R^*}} J_1(mr) dm. \quad (10)$$

每个电偶极子均具有独立的电磁场分量( $E_{x1}$ ,  $E_{y1}$ ,  $H_{x1}$ ,  $H_{y1}$ ,  $H_{z1}$  以及  $E_{x2}$ ,  $E_{y2}$ ,  $H_{x2}$ ,  $H_{y2}$ ,  $H_{z2}$ , 下标 1, 2 分别为两个场源电偶极子的分量),在式(3)中,  $E_z$  分量在除极高频外可以忽略不计,因此可以建立线性方程组,并通过简单的代数运算得到张量阻抗表达式:

$$\begin{aligned} Z_{xx} &= \frac{E_{x1}H_{y2} - E_{x2}H_{y1}}{H_{x1}H_{y2} - H_{x2}H_{y1}}, & Z_{xy} &= \frac{E_{x2}H_{x1} - E_{x1}H_{x2}}{H_{x1}H_{y2} - H_{x2}H_{y1}}, \\ Z_{yx} &= \frac{E_{y2}H_{y1} - E_{y1}H_{y2}}{H_{x2}H_{y1} - H_{x1}H_{y2}}, & Z_{yy} &= \frac{E_{y1}H_{x2} - E_{y2}H_{x2}}{H_{x2}H_{y1} - H_{x1}H_{y2}}. \end{aligned} \quad (4)$$

张量视电阻率可由张量阻抗求取:

$$\rho_{ij} = \frac{1}{5f} |Z_{ij}|^2. \quad (5)$$

当大地为水平层状介质或者均匀各向同性时,  $\rho_{xx} = \rho_{yy} = 0$ 。对于三维地质结构,一般情况下,所有分量不等于零且不相等,故在地质结构复杂,具有强烈各向异性的区域使用张量测量具有标量 CSAMT 不可替代的优势。因本文的研究基于水平层状大地,下面只对  $\rho_{xy}$  与  $\rho_{yx}$  进行讨论。

## 2 一维正演理论

设大地为均匀层状介质,且第  $N$  层的电阻率和厚度为  $\rho_n$  和  $h_n$ 。电偶极子位于大地表面,偶极矩为  $P = IdL$ ,两个垂直偶极子的交点即其各自的中心为所选取的直角坐标系和柱坐标系的坐标原点,坐标系的  $x$  轴与  $x$  方向的电偶极子重合,  $z$  轴方向垂直向下。则地表电磁场各分量表达式为:

式中:

$$R^* = \coth \left[ m_1 h_1 + \coth^{-1} \frac{m_1}{m_2} \coth \left( m_2 h_2 + \cdots + \coth^{-1} \frac{m_{N-1}}{m_N} \right) \right],$$

$$R = \coth \left[ m_1 h_1 + \coth^{-1} \frac{m_1 \rho_1}{m_2 \rho_2} \coth \left( m_2 h_2 + \cdots + \coth^{-1} \frac{m_{N-1} \rho_{N-1}}{m_N \rho_N} \right) \right],$$

$$m_j = \sqrt{m^2 - k^2}, \text{ 准静态下 } k_j^2 = \frac{i\omega\mu}{\rho_j}.$$

柱坐标系下的计算结果可由下式变换到直角坐标系下:

$$\begin{aligned} E_{x1} &= E_r \cos\varphi - E_\varphi \sin\varphi, \\ E_{y1} &= E_r \sin\varphi - E_\varphi \cos\varphi, \\ H_{x1} &= H_r \cos\varphi - H_\varphi \sin\varphi, \\ H_{y1} &= H_r \sin\varphi + H_\varphi \cos\varphi. \end{aligned} \quad (11)$$

对于  $y$  方向的电偶极子产生的各电磁场分量通过坐标变换可得到:

$$\begin{bmatrix} E_{x2} \\ E_{y2} \\ H_{x2} \\ H_{y2} \\ H_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -E_{y1}(y, -x) \\ E_{x1}(y, -x) \\ -H_{y2}(y, -x) \\ H_{x2}(y, -x) \\ H_{z2}(y, -x) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

### 3 场区划分依据

张量 CSAMT 测量必须满足远区场的条件,因此远区场的划分对实际工作有重要意义。在施工中往往通过给定一最小收发距  $r_{\min}$ , 将其作为过渡区与远区的界限, 在其之外进行测量。由于近场效应是源自于人工源产生的非平面电磁波, 从而造成视电阻率的畸变, MT 观测中电磁场为平面波, 不存在视电阻率畸变问题。因此, 借鉴汤井田的做法<sup>[14]</sup>, 使用张量视电阻率与 MT 中卡尼亚视电阻率的相对误差作为划分过渡区与远区的依据, 并定义如下参数:

$$\text{error}_{xy} = \left| \frac{\rho_{xy}^T - \rho_{xy}^{\text{MT}}}{\rho_{xy}^{\text{MT}}} \right| \times 100\%, \quad (13)$$

$$\text{error}_{yx} = \left| \frac{\rho_{yx}^T - \rho_{yx}^{\text{MT}}}{\rho_{yx}^{\text{MT}}} \right| \times 100\%。 \quad (14)$$

作为频率域测深方法, CSAMT 的远区条件与场源频率、地层电阻等因素相关。通过利用趋肤深度  $\delta \approx 503 \sqrt{\rho_1 / f}$  作为收发距的判别标准, 可以使得计算结果普适于不同频率与大地电阻率的情况。式中  $f$  为信号频率,  $\rho_1$  为施工区域大地首层电阻率, 可以通过样品、测井和经验去估计。在计算中, 张量

CSAMT 采用十字源发射装置,  $x, y$  轴方向发射偶极子中心重合与坐标轴原点且偶极矩相同。

### 4 水平均匀大地表面最小收发距

图 1、图 2 分别为均匀大地表面标量视电阻率  $\rho_{xy}^S, \rho_{yx}^S$  以及张量视电阻率  $\rho_{xy}^T, \rho_{yx}^T$  与 MT 视电阻率相对误差平面分布, 计算中所采用的频率为 1 Hz, 大地电阻率为  $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。实际上, 由于采用了趋肤深度作为归一化参数, 消除了发射源频率与大地电阻率对计算结果的影响, 这一点已通过多个频率与地电参数的数值模拟结果验证。由于相对误差大于或小于一定值 ( $>100\%$  或  $<0.1\%$ ) 时意义不大反而会影响图像显示, 故图中并没显示相应的误差数值 (下同)。总体来说, 无论对于标量还是张量视电阻率, 误差函数总是随着收发距的增大而减少, 这与人工源电磁波的性质相吻合。即收发距越大, 其电磁场正交性越好, 因此与 MT 所使用的平面波误差减小。同时, 除了  $\rho_{yx}^S$  外, 误差函数的分布与方位角  $\varphi$  存在相关性, 这点可由简单的代数推导获得, 对于  $\rho_{yx}^S$ , 其计算公式中不再含有  $\varphi$  项, 而其他电阻率参数中  $\varphi$  项不可略去, 因此造成了误差函数随着  $\varphi$  变化的特征。因为, 张量视电阻率与标量视电阻率计算方式的不同, 其误差函数的分布也理应不同, 图 1、图 2 的差异也证明了这点。可见标量 CSAMT 的  $r_{\min}$  定义方法已经不适用于张量观测方式, 需要重新定义适用于张量 CSAMT 的最小收发距。

同时, 需要注意的是  $r_{\min}$  研究的实际意义在于划分有效施工区域, 在实际施工中需要避开受人工源信号弱区影响。张量 CSAMT 由于同时采集 5 个分量信号, 其有效施工区域与标量 CSAMT 有所不同, 根据刘志新的工作<sup>[26]</sup>, 图 3 给出了张量 CSAMT 的有效施工区域, 图中给出的最小收发距是较为模糊的经验结果。当研究某一方向的  $r_{\min}$  时, 需注意  $\varphi$  位于有效施工区域内, 否则弱区内的观测并无实际意义。本文选取  $12.5^\circ$  研究  $r_{\min}$  (图 4)。

首先对均匀大地表面张量 CSAMT 与 MT 视电

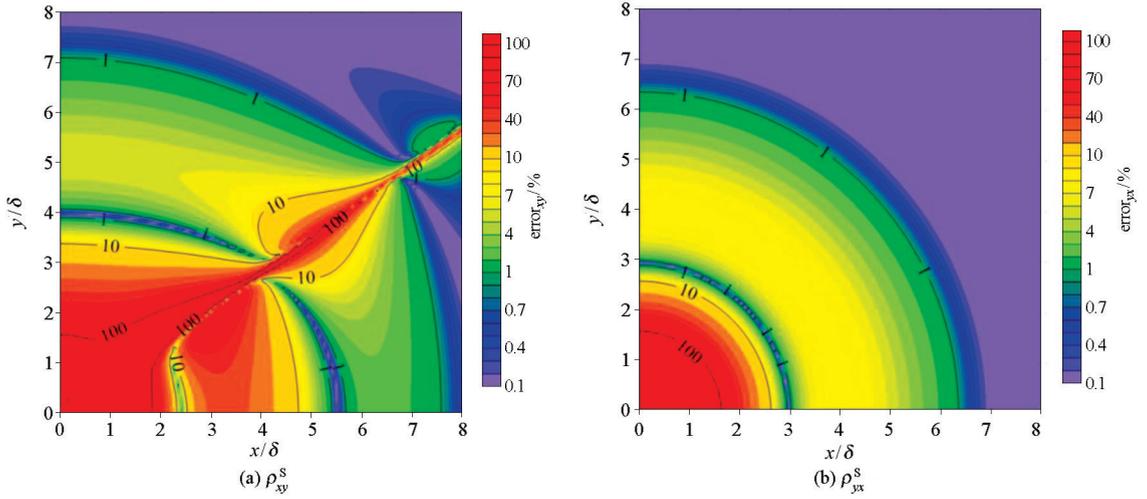


图 1 均匀大地表面标量 CSAMT 与 MT 视电阻率相对误差平面分布

Fig.1 Plane distribution of relative error for apparent resistivity between scalar CSAMT and MT above uniform halfspace earth

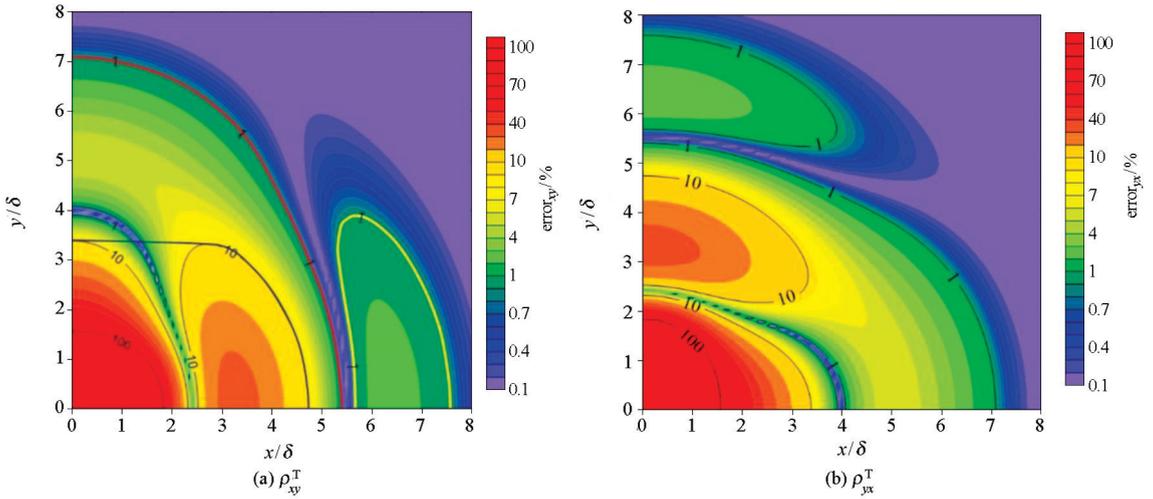


图 2 均匀大地表面张量 CSAMT 与 MT 视电阻率相对误差平面分布

Fig.2 Plane distribution of relative error for apparent resistivity between tensor CSAMT and MT above uniform halfspace earth

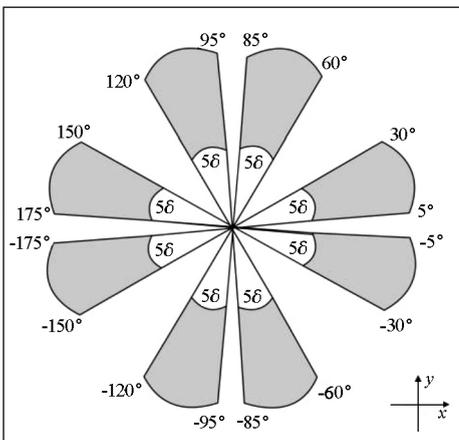


图 3 张量 CSAMT 有效施工区域

Fig.3 Effective observation area for tensor CSAMT 万方数据

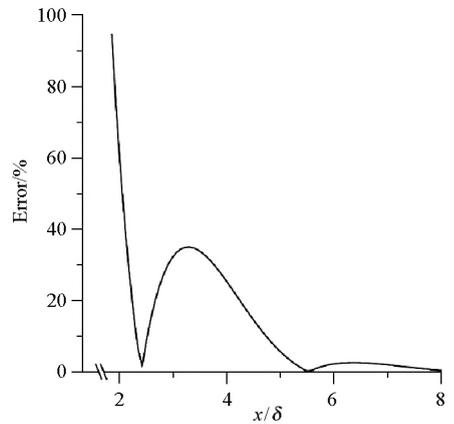


图 4 12.5° 方向 rho\_xy^T 相对误差变化曲线

Fig.4 Relative error of rho\_xy^T in direction of 12.5°

阻率相对误差平面进行分析。由于图 2 中相对误差分布较为复杂,对比图 2a、b 可知  $error(\rho_{xy}^T)$  与  $error(\rho_{yx}^T)$  分布形态相似,可通过简单旋转互相转换,故以  $error(\rho_{xy}^T)$  分布为例进行分析。

如图 2a 所示,在  $x = 2.4\delta, x = 5.6\delta, y = 4.0\delta$  附近存在带状相对误差低值区域,因此造成图 4 中  $error(\rho_{xy}^T)$  沿轴向变化曲线中的若干极小值,并使得相对误差总体上随收发距增大波动减小的趋势。结合表 1 分析可知,沿  $x$  轴方向的 1%、10% 误差限对应的收发距  $r$  均大于沿  $y$  轴方向收发距,但 3%、5% 误差限却远小于  $72.5^\circ$  轴方向。这是由于图 2a 右侧存在一个误差相对高值区域(黄线包围的区域),但该区域内相对误差并不是很大,最高值为 2.6%。通常较小的收发距信号强度较大,有利于保证探测深度与抗噪能力,故在布置源时应当将观测点置于椭圆短轴方向,即  $12.5^\circ$  方向。若进一步放宽精度要求

表 1 均匀大地表面张量 CSAMT 不同误差限所要求的最小收发距  $r$  值

Table 1 Minimum offset  $r$  required by different error limits for scalar CSAMT above uniform halfspace earth model

误差限	$r_{min}$			
	1%	3%	5%	10%
$\rho_{xy}^T$ $12.5^\circ$ 方向	7.5 $\delta$	5.1 $\delta$	5.0 $\delta$	4.7 $\delta$
$\rho_{yx}^T$ $12.5^\circ$ 方向	7.1 $\delta$	6.3 $\delta$	5.6 $\delta$	3.4 $\delta$

至 10%,此时图中蓝线所包围区域外部为满足测量精度要求的区域。同时,在设置观测点时应避开信号强度较弱的区域。

### 5 两层水平大地表面最小收发距

图 5、图 6 分别为 G 型与 D 型模型张量 CSAMT 与 MT 视电阻率相对误差在  $12.5^\circ$  方向随首层厚度

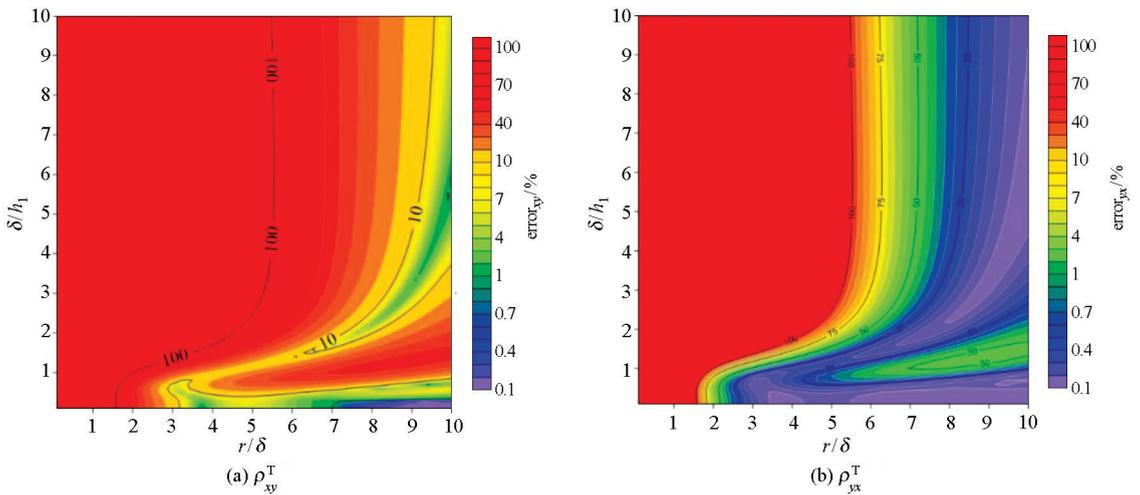


图 5 G 型模型张量 CSAMT 与 MT 视电阻率相对误差分布

Fig.5 Plane distribution of relative error for apparent resistivity between tensor CSAMT and MT above G-type model

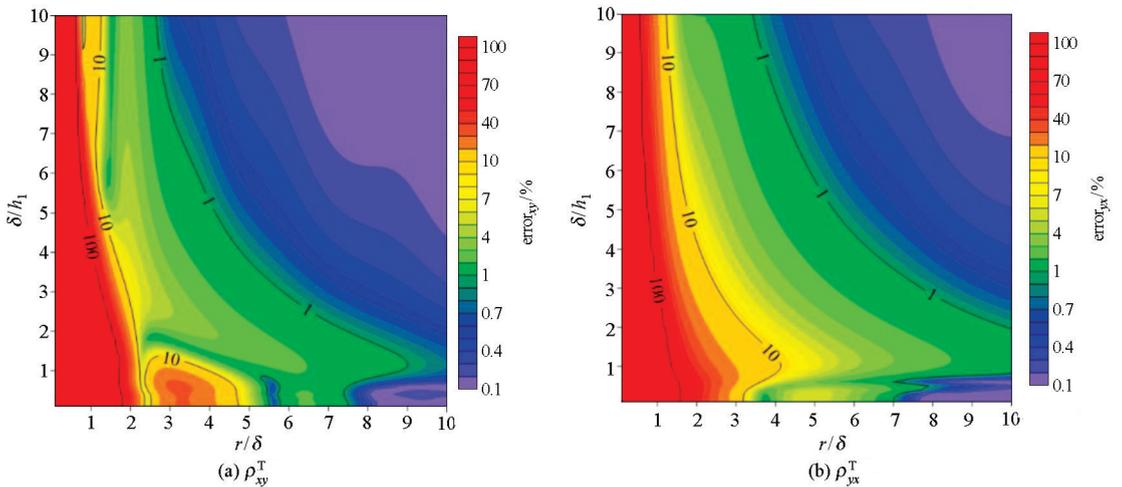


图 6 D 型模型张量 CSAMT 与 MT 视电阻率相对误差分布

Fig.6 Plane distribution of relative error for apparent resistivity between tensor CSAMT and MT above D-type model

变化的误差分布。文中所使用的 G 型模型  $\rho_1/\rho_2 = 0.1$ , D 型模型  $\rho_1/\rho_2 = 10$ ,  $\rho_1, \rho_2$  分别为首层与基底的电阻率。

对于图 5, 即首层为低阻层, 基底为高阻的情况, 可以看出当首层层厚较薄,  $\delta/h_1 > 0.5$  时, 均匀半空间中定义的  $r_{\min}$  已经不适用于 G 型模型。这是因为首层层厚较薄时, 电磁场能量较容易穿透首层, 当其传播到高阻基底时候衰减较慢, 所以此时由首层电阻率定义的趋肤深度实际上已不能满足电磁场衰减至地面处  $1/e$  的条件。而对于高阻基底介质来说, 其趋肤深度要远大于表层低阻介质, 这也是为什么首层越薄不同误差限所需要的  $r_{\min}$  越大。而实际上, 假设  $\delta/h_1 \rightarrow \infty$ , 采用高阻基底电阻率计算相对误差, 其分布与均匀半空间相同。

对于图 6, 即首层为高阻层, 基底为低阻的情况, 可以看出其规律与 G 型模型相反, 总体上随着

首层厚度减小, 各个误差限所需要的  $r_{\min}$  减少。这是由于当首层较薄时, 电磁场穿透至低阻基底后很快衰减, 从而满足趋肤深度的衰减条件, 此时有效趋肤深度应小于由表层高阻介质电阻率计算得到的趋肤深度, 故首层越薄不同误差限所需要的  $r_{\min}$  越小。

由图 5、图 6 可知, 对于两层大地, 当首层厚度较薄时, 采用均匀层状大地得到的不同误差限所需要的  $r_{\min}$  会引发很大的误差, 尤其是对于 G 型模型, 这一现象会大大地误导实际施工。而大多数工区的地质情况, 首层往往是松散低阻覆盖层, 电阻率偏小, 往往符合 G 型模型。因此, 本文随后通过改变电阻率与层厚给出大量模型的不同误差限所需要的  $r_{\min}$ , 为实际施工提供一定理论指导。

图 7~图 9 分别为模型空间内 1%、5%、10% 相对误差分布, 纵轴为对数坐标下基底与首层电阻率之比, 横轴为层厚变化。图 7~图 9 可应用于电阻率

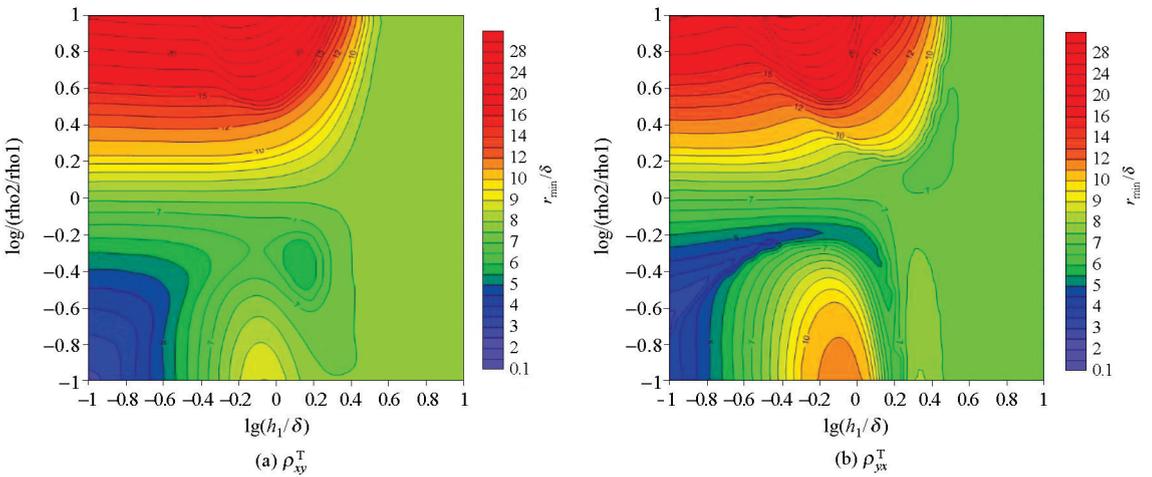


图 7 模型空间 1% 相对误差分布

Fig.7 Distribution of error 1% in model space

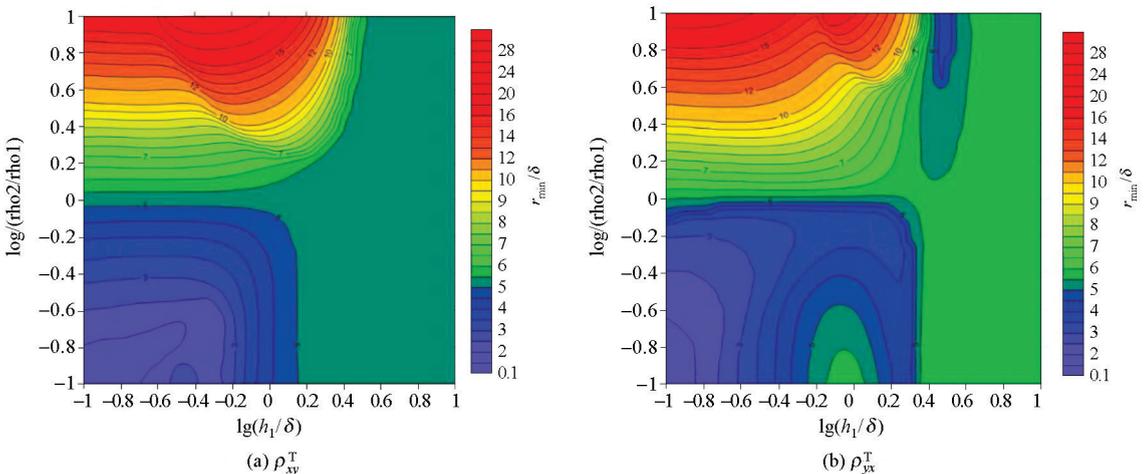


图 8 模型空间 5% 相对误差分布

Fig.8 Distribution of error 5% in model space

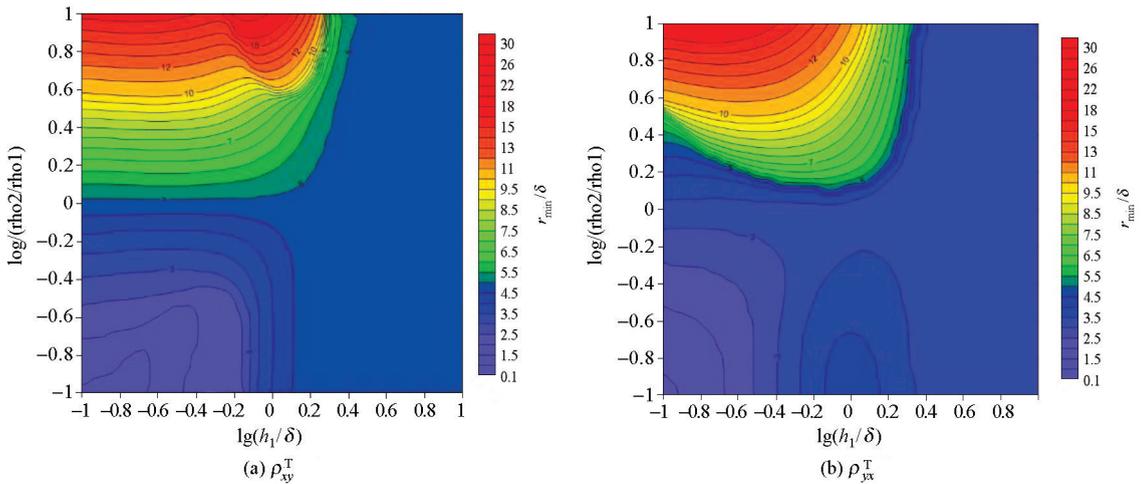


图9 模型空间10%相对误差分布

Fig.9 Distribution of error 10% in model space

与层厚分别在两个量级的地质模型中,其给出的不同误差限所需要的  $r_{\min}$  具有一定的理论指导意义。

总体上说,当首层厚度大于  $10^{0.5}\delta$  即约  $3\delta$  时,其结果与均匀半空间的差别很小;当基底电阻率增大时,不同误差限所需要的  $r_{\min}$  迅速增大,而当基底电阻率减小时,不同误差限所需要的  $r_{\min}$  减小;如采用均匀半空间模型的  $r_{\min}$ ,高阻基底模型所造成的误差远大于低阻基底模型。

## 6 多层水平大地表面最小收发距

对于多层模型,很难去计算一定数量级范围内的所有模型。对于首层电阻率最低或者首层层厚大于  $3\delta$  的情况,可直接根据均匀半空间结果选取  $r_{\min}$ 。而对于其他情况,根据汤井田<sup>[14]</sup>的工作,建议将基底上方各层等效为一层覆盖层,使用等效电阻率和层厚,并应用2层模型的结果。计算方法如下:

$$H' = h_1 + h_2 + \dots + h_n, \quad (15)$$

$$\rho' = H' / (h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2 + \dots + h_n/\rho_n)。 \quad (16)$$

## 7 结论

1) 利用与MT中卡尼亚视电阻率的相对误差,可以精确地得到不同误差限下远区所需的最小收发距。张量CSAMT与标量CSAMT的相对误差分布存在很大的差异,不能直接套用标量CSAMT的结果。根据张量CSAMT的有效施工区域,给出均匀半空间模型下  $12.5^\circ$  方向不同误差限的收发距。

2) 对于两层模型来说,当首层层厚较薄情况下,应用均匀半空间的结果会带来较大的误差,对于

G型模型误差更大。而当首层厚度大于3个趋肤深度时候,可以直接应用均匀半空间结果。本文计算了首层与基底电阻率比值、首层层厚与趋肤深度比值在两个数量级内的大量模型,精确给出了不同误差限下的最小收发距,计算结果对野外施工有一定的理论指导意义。

3) 对于多层模型,若首层电阻率最低或者首层层厚大于3倍趋肤深度,可直接根据均匀半空间结果选取  $r_{\min}$ 。否则,需要计算等效电阻率与层厚应用2层模型的理论结果。

## 参考文献 (References):

- [1] 孟庆奎.张量CSAMT数据采集与处理技术[D].北京:中国地质科学院,2013:1-3.  
Meng Q K.Acquisition and processing technology of tensor CSAMT data[D].Beijing:Chinese Academy of Geological Sciences,2013:1-3.
- [2] 雷达,张国鸿,黄高元,等.张量可控源音频大地电磁法的应用实例[J].工程地球物理学报,2014,11(3):286-294.  
Lei D,Zhang G H,Huang G Y, et al.The application of tensor CSAMT method [J].Chinese Journal of Engineering Geophysics,2014,11(3):286-294.
- [3] 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,2008:1-3.  
Di Q Y,Wang N.Forward and inversion of CSAMT data and its application[M].Beijing:Science Press,2008:1-3.
- [4] Goldstein M A,Strangway D W. Audio-frequency magnetotellurics with a ground electric dipole source [J]. Geophysics, 1975, 40(1): 669-683.
- [5] Zonge K L, Hughes L J. Controlled-source audiofrequency magnetotellurics measurements [J]. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, 1991, 2(B): 713-809.
- [6] 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,2005:1-8.

- Tang J T, He J S. Methods and applications of controlled source audio-frequency magnetotellurics [M]. Changsha: Central South University Press, 2005: 1-8.
- [7] 黄高元, 张国鸿. CSAMT 法张量与标量测量在已知铁矿区上的对比试验 [J]. 物探与化探, 2014, 38(6): 1207-1211.
- Huang G Y, Zhang G H. Comparative experiments of tensor and scalar measurement with CSAMT method in known iron ore minerals [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(6): 1207-1211.
- [8] Hu Y C, Li T L, Fan C S, et al. Three-dimensional tensor CSAMT modeling based on the vector finite-element method [J]. Applied Geophysics, 2015, 12(1): 35-46, 121.
- [9] Li X B, Pedersen L B, 邓前辉. 可控源张量大地电磁法 [J]. 地震地质译丛, 1993, 15(3): 35-42.
- Li X B, Pedersen L B, Deng Q H. Controllable source tensor magnetotelluric method [J]. Seismological Translation Series, 1993, 15(3): 35-42.
- [10] 孟庆奎, 林品荣, 李勇, 等. 张量 CSAMT 数据处理技术初步研究与示范应用 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2015, 45(6): 1846-1854.
- Meng Q K, Lin P R, Li Y, et al. Preliminary study and demonstration of tensor CSAMT data processing technology [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45(6): 1846-1854.
- [11] 周亚东. CSAMT 多偶极子源特征与张量测量研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- Zhou Y D. Characterization and tensor measurement of CSAMT multipole sources [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [12] 蔡军涛, 陈小斌, 赵国泽. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(一)——阻抗张量分解与构造维性分析 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(10): 2516-2526.
- Cai J T, Chen X B, Zhao G Z. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric I: Tensor decomposition and dimensionality analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(10): 2516-2526.
- [13] 栾晓东, 底青云, 雷达. 基于牛顿迭代法和遗传算法的 CSAMT 近场校正 [J]. 地球物理学报, 2018, 61(10): 266-277.
- Luan X D, Di Q Y, Lei D. Near-field correction of CSAMT data based on Newton iteration method and GA method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(10): 266-277.
- [14] 汤井田, 周聪, 肖晓. 复杂介质条件下 CSAMT 最小收发距的选择 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(6): 1681-1693.
- Tang J T, Zhou C, Xiao X. Selection of minimum transmit-receive distance of CSAMT in complicated media [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(6): 1681-1693.
- [15] 李鹤, 李桐林, 伍亮, 等. CSAMT 全区视电阻率转换及其效果分析 [J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2): 889-893.
- Li H, Li T L, Wu L, et al. Transformation of all-time apparent resistivity of CSAMT and analysis effect [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(2): 889-893.
- [16] 张凯, 许传建, 黄素荷, 等. 浅析 CSAMT 法近场地电信息与利用 [J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(8): 62-69.
- Zhang K, Xu C J, Huang S H, et al. A brief analysis of CSAMT near-field geoelectric information and utilization [J]. Coal Geology of China, 2018, 30(8): 62-69.
- [17] 周安, 张艳军, 苏佳虎. CSAMT 近场校正及全区视电阻率计算在找矿中的应用 [J]. 世界有色金属, 2018(11): 273-274, 276.
- Zhou A, Zhang Y J, Su J H. Application of CSAMT near-field correction and whole area apparent resistivity calculation in prospecting [J]. World Nonferrous Metals, 2018(11): 273-274, 276.
- [18] 王一鸣, 张国鸿. 张量 CSAMT 法中近场效应校正应用研究 [J]. 安徽地质, 2017, 27(1): 47-49.
- Wang Y M, Zhang G H. Application of near-field effect correction in tensor CSAMT method [J]. Geology of Anhui, 2017, 27(1): 47-49.
- [19] 刘俊峰, 邓居智, 陈辉. 基于 AMT 数据构建地电模型的 CSAMT 最小收发距估算 [J]. 地球物理学进展, 2016, 31(6): 2593-2597.
- Liu J F, Deng J Z, Chen H. Calculation of minimum separation between receiver and transmitter of CSAMT based on 1D model structured by AMT data [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2593-2597.
- [20] 尚通晓, 关艺晓, 朱首峰, 等. 中小收发距 CSAMT 在浅层地球物理勘查中的应用 [J]. 物探与化探, 2015, 39(2): 425-431.
- Shang T X, Guan Y X, Zhu S F, et al. The application of CSAMT with small and medium-sized transmit-receive distance to the shallow geological exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2): 425-431.
- [21] 马婵华, 鲁霞, 赵玉红, 等. 关于 CSAMT 法若干问题的探讨 [J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(5): 661-665.
- Ma C H, Lu X, Zhao Y H, et al. Discussion of several issues about CSAMT method [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(5): 661-665.
- [22] 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.
- Zhan S Q, Qian M P, Feng J J. The CSAMT Near-field correction method for electric field apparent resistivity forward iterative fitting [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(5): 663-665.
- [23] 严良俊. CSAMT 近场校正方法研究与应用 [A]//中国地球物理学会地球电磁学专业委员会. 第 8 届中国国际地球电磁学讨论会论文集 [C]. 2007.
- Yan L J. Research and application of CSAMT Near-field correction method [A]//Geomagnetics Committee of Chinese Geophysical Society. Papers of the 8th China International Symposium on Geomagnetism [C]. 2007.
- [24] 付长民. CSAMT 方法 2.5 维有限元模拟及近场校正 [A]//中国地球物理学会. 中国地球物理学会第 22 届年会论文集 [C]. 2006.
- Fu C M. 2.5-D finite element simulation and near-field correction of CSAMT method [A]//China Geophysical Society. Papers of the 22nd Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society [C]. 2006.
- [25] 杨生, 施婉华, 王庆乙. CSAMT 的非远场改正和二维解释问题 [J]. 地质与勘探, 1993, 29(9): 42-48.
- Yang S, Shi W H, Wang Q Y. Near-field correction and two-dimen-

sional interpretation of CSAMT data[J].Geology and Exploration, 1993,29(9):42-48.

[26] 刘志新,薛国强,张林波.张量 CSAMT 有效观测区域模拟对比分析[J].地球物理学报,2017,60(8):3278-3287.

Liu Z X,Xue G Q,Zhang L B.Comparison and analysis on effective observation area of tensor CSAMT by numerical simulation method [J].Chinese Journal of Geophysics,2017,60(8):3278-3287.

## Research on minimum transmit-receive distance of tensor CSAMT in layered media

ZHANG Chao<sup>1,2</sup>, CHEN Da-Lei<sup>1,2</sup>, WANG Yang<sup>1,2</sup>, WANG Hong-Jun<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Jinan 250013, China; 2. Shandong Geological Exploration Engineering Technology Research Center, Jinan 250013, China )

**Abstract:** According to the observation mode, Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric Method (CSAMT) can be divided into scalar CSAMT and tensor CSAMT. Due to the difference between the construction method and the resistivity calculation method, the minimum transmission and reception distance in the division of far-field of the scalar CSAMT cannot be accurately applied to the tensor CSAMT. According to the relative errors of tensor apparent resistivity and Magnetotelluric (MT) apparent resistivity, the relative errors of the homogeneous geodetic model and the two-layer model were calculated respectively, and the minimum transmission and reception distances under different error limits was accurately given. The results show that, for the two-layer model, when the thickness of the first layer is less than 3 times the skin depth, the result of homogeneous half space cannot be directly applied, which causes a large error for the G-type model. Multilayer results can be approximately evaluated from the two-layer model with equivalent resistivity. The research results in this paper have certain theoretical guiding significance for the tensor CSAMT field construction.

**Key words:** tensor CSAMT; relative error; minimum transmission and reception distances

( 本文编辑:沈效群)