



长株潭地区 CSAMT 法收发距探讨及 实例分析

曹创华^{1,3}, 邓 专¹, 柳建新^{2,3}

(1. 湖南省地质调查院, 长沙 410116;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

3. 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 长沙 410083)

摘 要:可控源音频大地电磁法(CSAMT)中的收发距和实测波区的响应数据息息相关, 决定着该方法的有效勘探深度。长株潭地区是我国经济高度发展的重点区域, 区内岩浆岩、褶皱、断裂发育; 出露岩石有砾岩、砂岩、泥岩、白云岩、灰岩和花岗岩等, 具有 CSAMT 探测地质构造和岩性接触带等地质现象的前提条件。但由于区内水系发育致使大部分岩石电阻率普遍较低, 而花岗岩电阻率相对较高, 在不同区域实施 CSAMT 时, 满足波区条件的收发距有所不同。根据区内不同岩性组成的典型地层结构进行数值计算, 计算出最佳收发距的大小, 并选取实例进行分析, 以期对此地区或者类似区域开展 CSAMT 法探测时有所参考。

关键词:长株潭地区; 可控源音频大地电磁法; 收发距; 实例分析

中图分类号: P631.3

文献标志码: A

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是在传统的大地电磁测深法(MT)基础上发展起来的, 由于其是人工源勘探, 具有可靠的分辨率等优点, 被广泛应用于地表下 1 km 内的地质构造和岩性接触带等地质勘探^[1]; 近年来在矿产资源勘探、地热资源开发、隧道地质灾害探测及水文地质构造等勘探中取得了一定的成果^[2]。但由于方法相对较新, 可控源音频大地电磁法测深的应用研究较少, 使得其在实际应用中仍存在一定的问題^[3], 特别是人工场源的引入, 在工作中需要确定数据采集区域是否位于近区、过渡区或远区, 只有在远区采集的数据才适用目前类似 MT 方法的处理程序对数据进行处理, 而发射源测量剖面之间的距离(即收发距)是决定远区的根本性因素。

对于工作中确保远区数据的收发距具体为多远, 目前没有具体的结论, 不同学者有不同的见解。ZONGE^[4]认为收发距大于电偶源发射的电磁波波长的二分之一(即 3 倍趋肤深度)时可近似认为进入远区; 石昆法^[5]根据野外经验和仪器所能接收的最小信号给出了下式:

$$\begin{cases} r \geq (3 \sim 6)H \\ r_{\max} = (IAB\rho_1 \sin(\varphi/\pi)E_{\min})^{1/3} \end{cases} \quad (1)$$

式中: r 为接收点到偶极中心矢径 r 的模(简称收发距); H 为勘探深度; I 为发射电流; AB 为供电偶极子的长度; φ 为 r 与 AB 之间的夹角; $E_{\min}$ 为接收机能观测到的最小信号, 一般取 $7 \mu\text{V}$ 。式(1)中的 r 满足了远区的条件, $r_{\max}$ 为满足观测精度的要求。处理资料时所用的参数是以最小可用频率为首要条件的, 最低频率按照下式进行计算^[5]:

$$\begin{cases} f_L = 4.0 \frac{\rho_a}{r_{\max}^2} \\ f_L = \pi \left(\frac{356}{H} \right)^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_L 表示所需最低频率, 取上式中的两者最小; ρ_a 表示平均电阻率; $r_{\max}$ 表示最大收发距; H 为勘探深度。PFAFFHUBER^[6]设计了简单模型进行了正演计算得到电偶极子的远区电磁场距离与趋肤深度之间呈线性关系, 并给出远区场距离估算公式。岳瑞永等^[7]深

入讨论了电方位各向异性介质条件下收发距和趋肤深度的关系。王若等^[8]讨论了4种可在高山峡谷方便测量方式的电磁场特征,认为通常收发距在6~8 km较为合适。陈明生等^[9]利用地层波与地面波之比给出了精确定义远区的方法。林威^[10]认为卡尼亚视电阻率与电场视电阻率的相交点所对应的频率可作为远区数据的最低频率。汤井田等^[11]通过设计的模型认最小收发距应大于7倍的勘探深度。曹创华^[12]计算表明,在普遍高阻岩石条件下满足1 Hz频率以上的最小收发距在11 km以上。柳建新等^[3]在承担中国地质调查局科研项目中发现,很多勘探实例的可控源音频大地电磁方法探测结果都呈“三明治”形状,作者通过对视电阻率频率曲线分析,发现大部分数据很难利用的主要原因都是由于收发距过小引起。以上科研成果表明:可控源音频大地电磁法的收发距要因地制宜,具体问题具体分析,要根据研究区域的地层电阻率设置模型进行计算或者进行收发距野外实验对比测深视电阻率曲线才能得出合理的结论。

近年来,湖南省地质勘查科研与生产单位近年来在温泉调查、水文地质灾害和矿产资源深部调查工作中开展了很多可控源音频大地电磁测深法工作;特别是长株潭地区作为湖南省经济核心区(见图1),随着社会的发展,地质工作日渐趋多。比如长沙市宁乡县灰汤镇是国内少有的温泉之乡,株洲市醴陵柏市镇也有温泉点出露,长株潭城际铁路沿线在湘江附近,第四系和第三系覆盖较厚,对隐伏构造的探查研究可控源音频大地电磁法都有所涉及。

本研究中,根据长株潭地区的实际地层条件设计了各种模型,依据频率域电磁法和可控源音频大地电磁法的理论公式深入进行了收发距探讨。首先,在了解长株潭地区的地质地层基础上,根据已有地球物理特征资料,设计了灰岩地层、花岗岩地层等以及组合地层模型。其次,利用频率域大地电磁和可控源音频大地电磁法的正演理论进行了计算,确定了满足长株潭地区各种地层组合的收发距长度和探测频率之间的关系。最后,利用长株潭区域内株洲市攸县柏市镇温泉水村可控源音频大地电磁法探测温泉研究项目作为实例进行了分析。

1 长株潭地质概况

1.1 地层

区内出露地层较多(见图2),伴有岩浆岩出露,伴随着历史上的各种地质运动产生了各种断裂构造和不

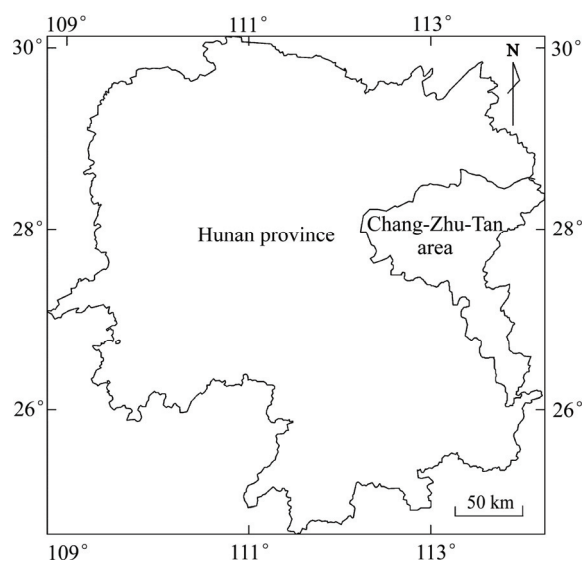


图1 长株潭区位示意图

Fig. 1 Position map of Chang-zhu-tan area

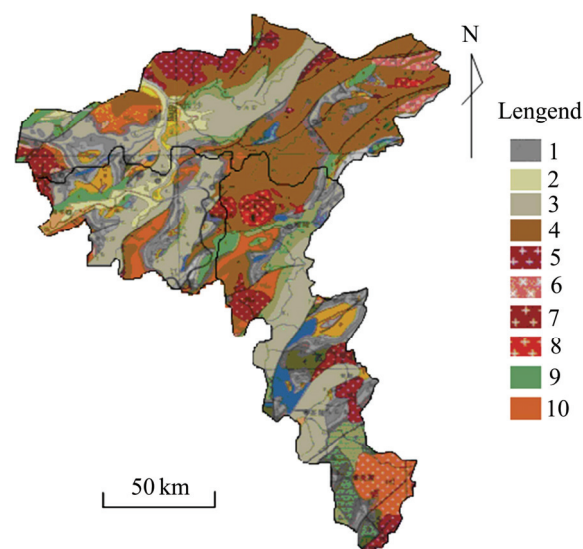


图2 长株潭区域地质图^[13]: 1—灰岩、泥灰岩; 2—第四系; 3—红色砂岩、钙质岩和砂砾岩; 4—板岩、变质砂岩; 5—二长花岗岩; 6—富斜花岗岩; 7—角闪石黑云母花岗岩; 8—花岗岩; 9—泥质粉砂岩; 10—变质砂岩

Fig. 2 Geological map of Chang-zhu-tan area^[13]: 1 — Limestone, marl; 2 — Quaternary; 3 — Red sandstone, calcareous rocks and conglomerate; 4 — Slate, metamorphic sandstone; 5 — Adamellite; 6 — Rich granite ramp; 7 — Hornblende biotite granite; 8 — Granite; 9 — Argillaceous siltstone; 10 — Metasandstone

同程度的隆起和拗陷。

1.1.1 岩性

区内地层出露由老至新为新元古界冷家溪群、板溪群,晚古生界泥盆系、石炭系、二叠系,中生界三

叠系、侏罗系、白垩系, 新生界古近系、第四系等。其中岩性具体有灰岩、泥质灰岩、砾岩、砂岩、板岩和白云岩等。

1.1.2 岩浆岩

区内岩浆岩较发育, 且种类较多, 产状、规模各异, 有侵入岩基、岩株及岩脉, 主要有黑云母二长花岗岩、二云母二长花岗岩、花岗斑岩脉和辉绿(玢)岩脉等。

1.1.3 地质构造

区内主要经历了武陵运动、雪峰运动、加里东运动、印支运动、燕山运动、喜山运动等六次大的构造运动, 正是这些多期次、多旋回的构造运动造成了图区内各构造层间明显的区域角度不整合和复杂的地质构造形迹。根据测区地层出露情况、构造变形与岩浆活动特征, 自北西南东可划分为沅山隆起、韶山-湘乡拗陷、茶恩寺-板杉铺隆起、株洲拗陷等, 低洼区域分布广泛。

区内被具有近似垂直的区域 5 大断裂系统切割, 其中慈利-醴陵断裂带呈东南-西北向, 株洲-永州断裂、醴陵-宁远断裂、茶陵-蓝山断裂和炎陵-长城岭断裂大致等间距平行呈西南-东北向展布, 具有早期活动呈压性, 晚期转化为张扭具走滑的特征。据图 2 中的地表地质图, 区内主要出露岩性为变质砂岩、砂砾岩和板岩等; 火成岩类主要存在于区域内的北部局部、南部炎陵县域内, 其余地方偶有出露。频率域可控源音频大地电磁法探测前提是岩性具有物性差异,

探测目标以地质构造和岩性接触带引起的异常为主。

1.2 地球物理特征

长株潭地区的地球物理工作较为丰富, 测量物性的参数方法也有很多, 比如露头小四极、孔旁电测深和测井等; 每种方法测量的结果都有一定的范围, 已有资料的搜集结果见表 1。

温泉的形成有热源、控热构造、热储和盖层等结构^[14], 热源往往来自深部花岗岩等火成岩, 控热构造一般为深断裂和其在地质运动过程中产生的次级断裂, 热储在长株潭地区一般为二叠系、泥盆系灰岩及其形成的岩溶小裂隙等, 而盖层在长株潭地区往往为分布较为广泛且较厚的第三系红层(具体包括泥质粉砂岩、钙质泥岩、泥质灰岩等), 通过表 1 所述, 可以看出在温泉探查中各种地质结构的探查具有明显的地球物理特征差异, 从而证实可控源在探测断裂方面具有得天独厚的优势。随着长株潭一体化高速发展, 区域地质灾害调查的工作也逐步展开^[14], 基础地质成果的提供成为建设城市的必要; 长株潭地区的沅山岩体、蕉溪岭岩体等为出露的花岗岩体, 而大部分地区呈盆地形式存在, 第四系和第三系覆盖较厚, 对于岩体深部延伸、不同岩性在地表下深部是如何接触, 产状和走向等很多情况未知, 更为致命的是在第三系、第四系的地层电阻率普遍太低, 常规电法探测由于能量消耗太大, 往往难以探测到目的地层, 在此情况下, 人工源频率域电磁测深可以有所作为。

表 1 长株潭地区岩石参数统计表^[15]

Table 1 Statistics of rock parameters in Chang-Zhu-Tan area^[15]

Lithology	Determination	Resistivity/(Ω·m)	
		Range	Common value
Net-like clay	Outcrop quadrupole	322-666	495
Loam and clay	Outcrop quadrupole	30-160	50
Sandy gravel	IP sounding adjacent in borehole	85-200	133
Siltstone	Outcrop quadrupole	30-70	55
Conglomerate	Logging	40-1500	583
Sandstone	Outcrop quadrupole	460-2560	1510
Mudstone	Outcrop quadrupole	58-193	125
Lime-dolomite	Logging	490-3800	2590
Gray matter conglomerate	IP sounding adjacent in borehole	100-2000	1500
Carbon and mud lime stone	Logging	70-300	173
Metamorphic sand slate	Logging	420-4200	1890
Granite	Logging	1112-21000	8000

2 MT、CSAMT 法理论及长株潭地区典型岩性组合收发距计算

2.1 MT 及 CSAMT 法理论

目前常用的 MT 采集频率范围是 0.0001~10000 Hz, 根据电磁场特点和笛卡尔直角坐标系中(见图 3)TE 极化模式和 TM 极化模式的定义, 最终得到如下式^[16]:

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_{xy}|^2 = \frac{1}{5f} |Z_{xy}|^2 \quad (3)$$

$$\phi_{xy} = \arctan \left[\frac{\text{Im}(Z_{xy})}{\text{Re}(Z_{xy})} \right] \quad (4)$$

式中: ρ_{xy} 是卡尼亚视电阻率; ϕ_{xy} 是阻抗相位; f 是频率; Z_{xy} 为阻抗(这个量为复数, Re 表示其实部, Im 表示其虚部); ω 代表角频率; μ_0 表示为地球的磁导率; x, y 分别笛卡尔直角坐标系中 x 轴和 y 轴方向。

对于一维电性结构模型, 据式(3)和(4), 对 MT, 地表下第 n 层表面的波阻抗 Z_n 通过下面的递推计算公式可得^[16]:

$$Z_n = Z_{0n} \frac{1 + \frac{Z_{n+1} - Z_{0n}}{Z_{n+1} + Z_{0n}} e^{-2k_n h_n}}{1 - \frac{Z_{n+1} - Z_{0n}}{Z_{n+1} + Z_{0n}} e^{-2k_n h_n}} \quad (5)$$

式中: e 为自然指数; Z_{0n} 、 k_n 、 Z_n 分别为第 n 层的特征阻抗、第 n 层的复传播系数和第 n 层表面的波阻抗。

对于可控源音频大地电磁法的一维正演, 将均匀半空间表面水平电偶源产生的电磁场表示为(见图 3 中的坐标系)^[17-18]:

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi r^3} \rho [3 \cos^2 \varphi - 2 + e^{ikr} (1 - ikr)] \quad (6)$$

$$H_y = -\frac{IdL}{4\pi r^2} \cdot \{ \sin^2 \varphi [6I_1 K_1 + ikr(I_1 K_0 - I_0 K_1)] - \cos^2 \varphi I_1 K_1 \} \quad (7)$$

若令:

$$C_E = 3 \cos^2 \varphi - 2 + e^{ikr} (1 - ikr) \quad (8)$$

$$C_H = \sin^2 \varphi [6I_1 K_1 + ikr(I_1 K_0 - I_0 K_1)] - \cos^2 \varphi I_1 K_1 \quad (9)$$

则:

$$E_x = \frac{IdL\rho}{2\pi r^3} C_E \quad (10)$$

$$H_y = \frac{IdL\rho^2}{4\pi r^3 \sqrt{\mu\omega}} C_H e^{i\frac{\pi}{4}} \quad (11)$$

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = 2\sqrt{\mu\omega\rho} \frac{C_E}{C_H} e^{-i\frac{\pi}{4}} \quad (12)$$

即可以得到类似天然源 MT 的计算公式:

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_{xy}|^2 \quad (13)$$

$$\phi_{xy} = \arctan \left[\frac{\text{Im}(Z_{xy})}{\text{Re}(Z_{xy})} \right] \quad (14)$$

式(6)~(14)中: E_x 、 H_y 分别为电、磁场水平分量(图 3 中 x 方向和电偶极子方向相同与测线平行, y 方向为垂直测量方向, z 轴垂直向下)。 r 为接收点到偶极中心矢径 r 的模; e 为自然指数; φ 为 r 和 x 轴的夹角; I 为发送电流强度; dL 为电偶极子长度; μ 和 ρ 分别是均匀半空间的导磁率和电阻率; ω 代表角频率; μ_0 表示为地球的磁导率; k 表示电磁波传播波数, 在准静态极限下有 $k^2 = i\mu\omega/\rho$; I_1 、 I_0 和 K_1 、 K_0 分别是第一和第二类以 $\frac{ikr}{2}$ 为宗量的虚宗量贝塞耳函数, 0 和 1 代表阶数^[17-18], ρ_{xy} 是卡尼亚视电阻率, ϕ_{xy} 是阻抗相位, Z_{xy} 为阻抗(Re 表示其实部, Im 表示其虚部)。

图 3 所示为 CSAMT 和 MT 观测层状模型示意图, x 轴垂直纸面向外, y 轴垂直于 x 轴, z 轴垂直于 x 轴和 y 轴确定的平面, 电偶源 AB 沿 x 轴分布, AB 中心点为 x 轴 0 点, 测线与 x 轴平行, 地表下地层第一层的电阻率设为 ρ_1 , 厚度为 h_1 , 第二层的电阻率为 ρ_2 , 以此类推, 最底部为第 n 层。CSAMT 是 AB 供电时在测线上进行数据测量, 而 MT 是无人工源条件下进行的数据测量, 所测参数一致。

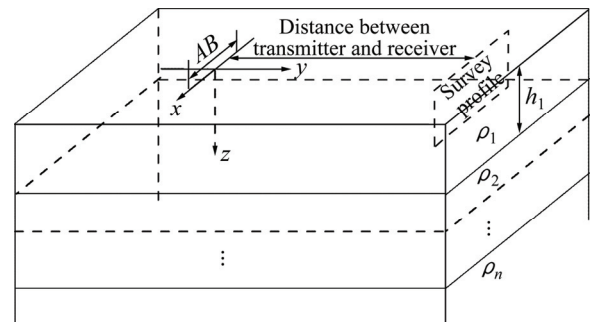


图 3 MT、CSAMT 法层状模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Layered model of MT and CSAMT method

2.2 长株潭地区典型岩性组合收发距计算

据表 1 可知, 在长株潭区域, 砂岩、灰质砾岩的电阻率在 1500 $\Omega \cdot m$ 左右, 灰岩、白云岩电阻率在 2590

$\Omega \cdot m$ 左右; 网纹状粘土、砾岩的电阻率为 $500 \Omega \cdot m$ 左右, 粘土、粉砂岩的电阻率为 $50 \Omega \cdot m$ 左右, 花岗岩的电阻率在 $8000 \Omega \cdot m$ 左右。CSAMT 数据处理都用远区数据进行反演解释, 远区处理的方式是 MT 反演方法, 所以本研究中将对同种模型的 MT 响应和 CSAMT 响应做比较, 通过其相对误差不超过 10% 为评价标准。用 E_ρ 表示同等条件下 CSAMT 和 MT 电阻率误差, 如下式所示:

$$E_\rho = \left| \frac{\rho_f^{CSAMT} - \rho_f^{MT}}{\rho_f^{MT}} \right| \times 100\% \quad (15)$$

由于粘土、粉砂岩往往存在地表, 根据以上分析, 可以设计下列 8 种情况进行分析计算, 得到准确的收发距。第一种为 $500 \Omega \cdot m$ 的地层, 以网纹状粘土、砾岩为代表; 第二种为 $1500 \Omega \cdot m$ 的地层, 以砂岩、灰质砾岩为代表; 第三种为 $2590 \Omega \cdot m$ 的地层, 以灰岩、白云岩为代表; 第四种为 $8000 \Omega \cdot m$ 左右, 以花岗岩类为代表; 后 4 种设计模型是前 4 种的首层是第四系, 其电阻率为 $50 \Omega \cdot m$ 左右, 以粘土、粉砂岩为代表。图 4~11 为上述 8 种情况下的 E_ρ 计算结果相对误差等值线结果, 后 4 种情况下首层低阻层的厚度为 20 m。

在图 4~11 中, 横坐标 r 为可控源音频大地电磁测深的收发距, 纵坐标为计算的频率(本文中采用的频率为目前常用的 CSAMT 测量频组: $f=[0.125 \ 0.25 \ 0.5 \ 1 \ 1.41 \ 2 \ 2.82 \ 4 \ 5.6 \ 8 \ 11.2 \ 16 \ 22.4 \ 32 \ 45 \ 64 \ 90 \ 128 \ 180 \ 256 \ 360 \ 512 \ 721 \ 1024 \ 1441 \ 2048 \ 2882 \ 4096 \ 5765 \ 8192] \text{Hz}$)以 10 为底的对数($\lg(f/\text{Hz})$); 8 种结果所用色标统一, 由蓝色到红色表示误差由小到大; 其中蓝色范围为同等条件下 CSAMT 和 MT 视电阻率误差小于

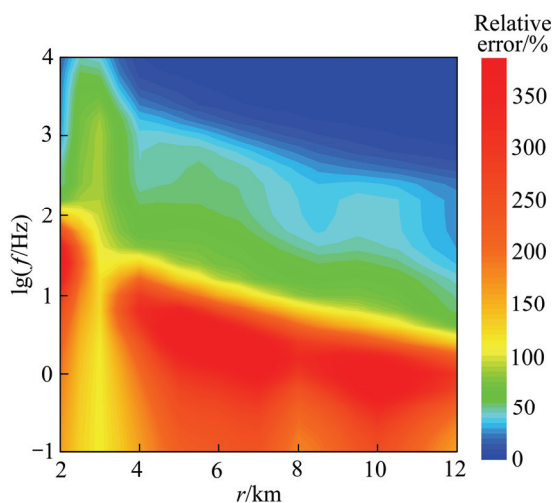


图 4 粘土、砾岩为代表的地层视电阻率相对误差

Fig. 4 Relatively error of apparent resistivity of clay and shale

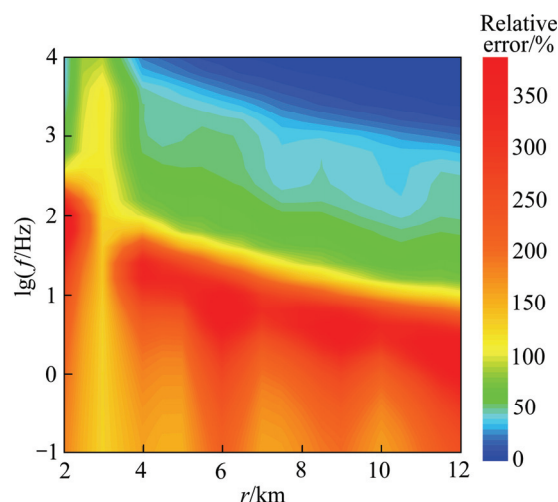


图 5 砂岩、灰质砾岩为代表的地层视电阻率相对误差

Fig. 5 Relatively error of apparent resistivity of sandstone and conglomerate gray

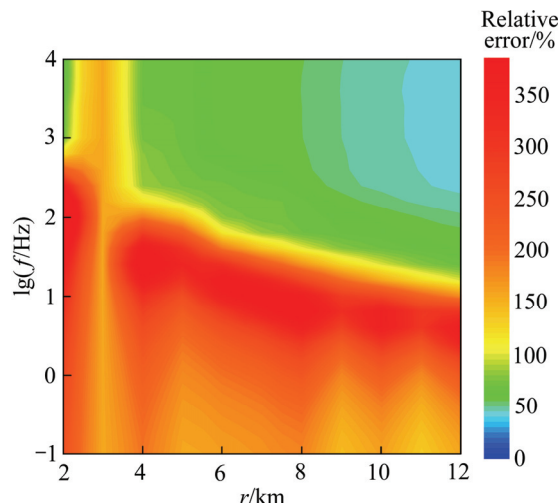


图 6 灰岩、白云岩为代表的地层视电阻率相对误差

Fig. 6 Relatively error of apparent resistivity of limestone and dolomite

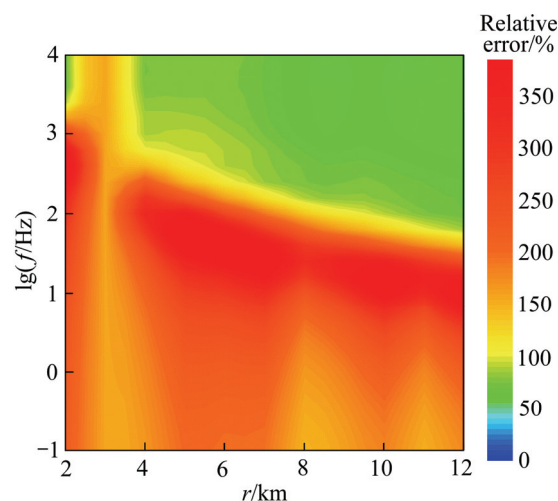


图 7 花岗岩类为代表的地层视电阻率相对误差

Fig. 7 Relatively error of apparent resistivity of granite

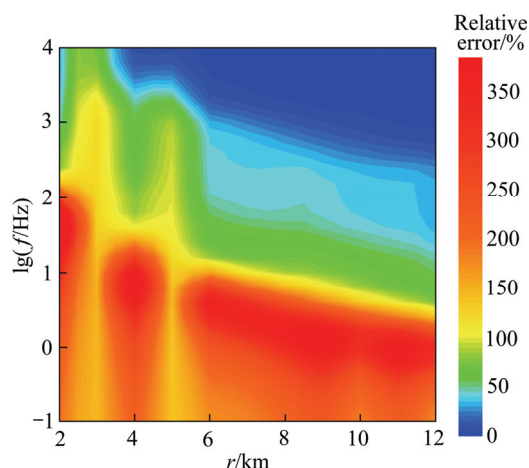


图 8 地表低阻粘土、砾岩为代表的地层视电阻率相对误差
Fig. 8 Relatively error of apparent resistivity of clay and shale with low resistivity in surface

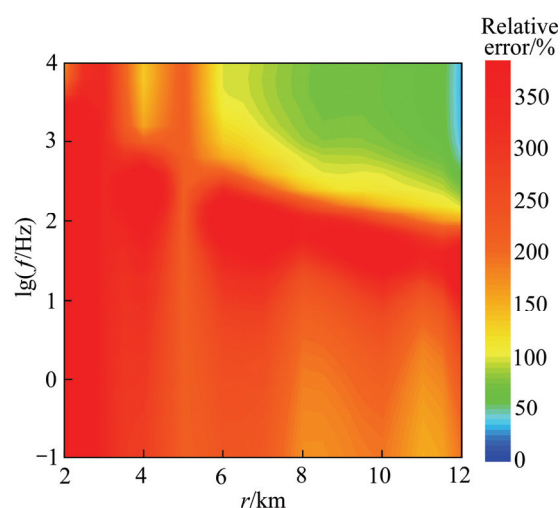


图 11 地表低阻花岗岩类为代表的地层视电阻率相对误差
Fig. 11 Relatively error of apparent resistivity of clay and shale with low resistivity in surface

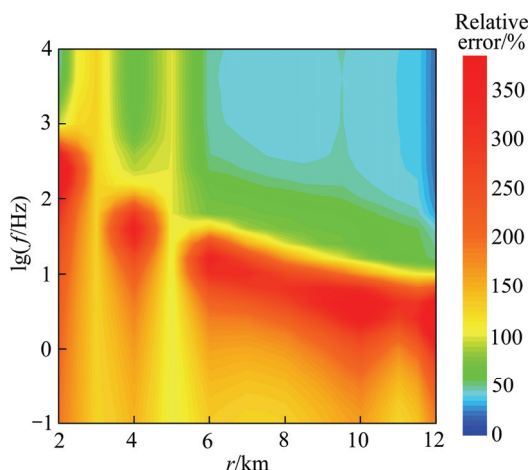


图 9 地表低阻砂岩、灰砾岩为代表的地层视电阻率相对误差
Fig. 9 Relatively error of apparent resistivity of clay and shale with low resistivity in surface

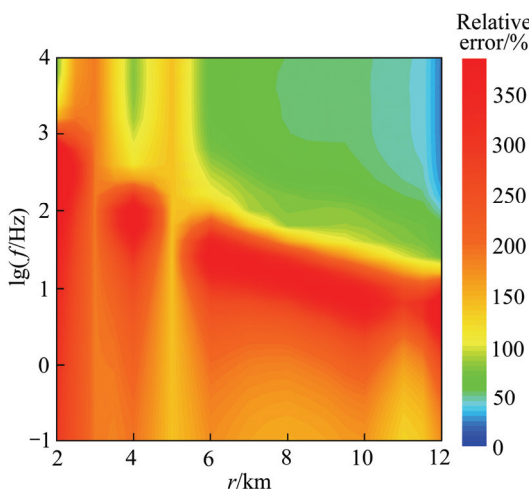


图 10 地表低阻灰岩、白云岩为代表的地层视电阻率相对误差
Fig. 10 Relatively error of apparent resistivity of clay and shale with low resistivity in surface

等于 10% 的范围(以 10% 为界值, 认为小于此误差为可利用频率范围用 MT 方式处理数据)。

图 4~11 都具有以下特点: 随着收发距的增加, 可利用的可控源数据最低频率越来越低, 范围越来越大, 可以探测的有效深度越来越深; 同等收发距条件下, 随着地层电阻率的增加, 可利用可控源数据的最低频率越来越高, 范围越来越小; 当地表有 20 m 厚的低阻层时, 随着基底底层的岩石电阻率增大, 由于浅地表低阻带存在, 在同等条件下可用频率数值变大; 但在最低可用频率的位置会出现局部误差最大值。综上所述, 图 4 和图 8 表明网纹状粘土、砾岩为代表的地层收发距为 6000 m 时最低可用频率大致为 360 Hz, 收发距在 8000 m 时最低可用频率为 32 Hz, 而当收发距为 12000 m 时最低可用频率在 8 Hz; 图 5 和图 9 表明以砂岩、灰质砾岩为代表的地层在收发距为 6000 m 时最低可用频率大致为 1024 Hz, 收发距在 8000 m 时最低可用频率为 360 Hz, 而当收发距为 12000 m 时最低可用频率在 128 Hz; 图 6 和图 10 表明为以灰岩、白云岩为代表的地层在收发距为 6000 m 时最低可用频率大致为 1441 Hz, 收发距在 8000 m 时最低可用频率为 512 Hz, 而当收发距为 12000 m 时最低可用频率在 256 Hz; 图 7 和图 11 表明以花岗岩类为代表的地层在收发距为 6000 m 时最低可用频率大致为 5765 Hz, 收发距在 8000 m 时最低可用频率为 1441 Hz, 而当收发距为 12000 m 时最低可用频率在 721 Hz。

按何继善和汤井田等专家给出的结论^[17-18], 频率域电磁法趋肤深度计算公式如下:

$$D=356 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (16)$$

式中: f 为探测频率; D 为探测深度; ρ 为探测地层电阻率。相对 MT 法, CSAMT 法在引起 10% 的卡尼亚视电阻率误差时, 结合图 4~11, 基本上频率都会增加 1~2 个数量级, 对应的趋肤深度为同等条件下 MT 法趋肤深度的 91%~95%。

3 实例分析

选取湖南省株洲市攸县柏市镇温水村温泉探查研究项目作为实例进行分析。

3.1 地质概况

地层以石炭系、泥盆系和二叠系的地层为主, 具体岩性有灰黑色页岩、白云质、灰黑色砂岩板状页岩、中厚层粉砂岩和灰岩等。根据初步地质调查, 区内的地热通道主要由主控断裂为杨滨断裂控制。由于区域地质各个期次的运动, 形成的次级断裂有宋家断裂、新漕泊断裂等(见图 12)。

图 12 中, 蓝色小点为设计的可控源音频大地电磁

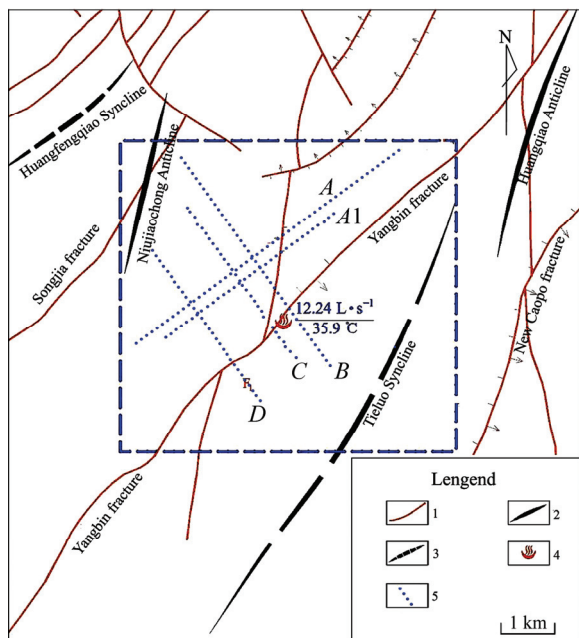


图 12 地热调查研究区构造纲要简图: 1—断裂及名称; 2—背斜; 3—向斜; 4—地热露头; 5—CSAMT 测点

Fig. 12 Structure outline map of geothermal survey area: 1—Fracture; 2—Anticline; 3—Syncline; 4—Geothermal outcrop; 5—CSAMT measuring point

法的测点, 共设计了 5 条测线, 目前发现的温泉点出露温度为 35.9 °C, 流量为 12.24 L/s, 温度相对较高, 位于图幅中部的近南北向断裂和杨滨断裂交汇部位。

3.2 数据采集方案

按照经验, 根据 Bostick 公式换算^[19]:

$$f \leq \frac{356^2 \cdot \rho}{D^2} \quad (17)$$

式中: f 为探测频率; D 为探测深度; ρ 为探测地层电阻率; 通过地质调查, 此区域内页岩、白云质灰黑色砂岩板状页岩分布较广, 而灰岩白云岩分布较少, 电阻率应在 1000 $\Omega \cdot m$ 左右, 假如探测深度为 1000 m, 按照式(16)计算可知, f 的最小探测频率应在 126 Hz。

按照第 2 节讨论, 此温泉成温区域的电阻率在第一种和第二种情况之间, 可以认为其满足 126 Hz 以上的频率在远区的收发距大于 10 km 即可达到探测目标深度。最终实地调查后我们选择的收发距为 11.2 km。

按照中国地质调查局地质调查标准, 提供了两个频段, 1~8192 Hz 或者 0.125~8192 Hz, 所以采集频率选择前者。

赵广茂等^[20]认为当收发距大于 10 倍的电偶极距时才能视作电偶极子, 而小于 10 倍时仅能做线电流源, 所以本实例选择的 AB 极距为 1000 m。

3.3 数据评价及处理

此区内按照 3.2 节的设计进行了赤道偶极数据采集, 通过野外实测的卡尼亚视电阻率和频率, 经过静态校正, 滤波, 剔除飞点, 以线 A 的 1200 号测点的实测数据进行分析(见图 13)。

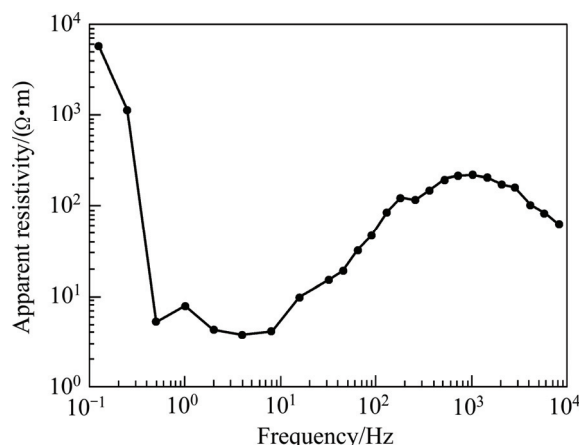


图 13 A 线 1200 号测点实测曲线

Fig. 13 Measured curve of 1200 station of line A

在图 13 中,远区数据在 11.2~8192 Hz;过渡区在曲线的波谷区域,频率范围为 1~11.2 Hz;近区呈近似 45°上翘特征,其频率范围小于 1 Hz。且整个远区的视电阻率都小于 1000 $\Omega\cdot\text{m}$,反演后会更小,说明布置地电观测系统前的要求完全符合要求,可利用频率 11.2 Hz 小于 126 Hz。整个远区范围的电阻率测深曲线近似于 K 型,浅部 1141~819 2Hz 电阻率呈下降趋势;128~1141 Hz 视电阻率趋于平稳为局部较大值,但此区间 128~256 Hz 之间的数据有局部曲折现象,说明此频段所测对应部位可能存在断裂;1~128 Hz 存在一个低阻带。

最后经过 Occam 二维反演^[1],由于篇幅所限仅仅列出 A 线探测结果及地质解释图(见图 14)。其中图 14(a)为反演电阻率断面,图 14(b)为物探解释剖面。图 14 中高低阻分界线明显,其中推断断裂 F1 在 2200 号测点及 2250 测点附近,推测其延伸向小号点延伸(即:倾向南东,倾角约 75°~85°);推断断裂 F2 向大号点延

伸(即:倾向西南,倾角 115°~135°)在 1750 号测点附近出露地表;推断断裂 F2 被推断断裂 F1 错开,两者关系为张性关系,两个断裂是主要控热、控水断裂,为水分的来源提供了通道,但通道较小;在海拔 200 m 和-300 m 之间形成了一个盖层(岩性可能为白云质岩类,相对呈高阻)为深部的低阻异常提供了相对封闭的空间,顶部直至地表为水的补给区。其它两个断裂分别在 200 号测点和 1350 号测点附近,两者产状均较陡,其中 1350 号测点的推断断裂 F3 和推断断裂 F1 引起的低阻保温层可能在深部交汇;200 号测点附近的推断断裂 F4 推测为普通断裂,深度延伸较浅,产状与推断断裂 F1 相似,但不是储热通道;其中推断断裂 F3 的倾向为东南,倾角 85°左右,推断断裂 F4 与推断断裂 F3 产状相似,疑似平行断裂。由图 7 中所推测的地质结果如下:地表层由 $n\text{ cm}\sim n\text{ m}$ 厚度不等的第四系 Q4 组成;中间层的电阻率大致在 190~1700 $\Omega\cdot\text{m}$,常见值在 400 $\Omega\cdot\text{m}$ 左右,推测由石炭系 C_{2+3} 白云岩、

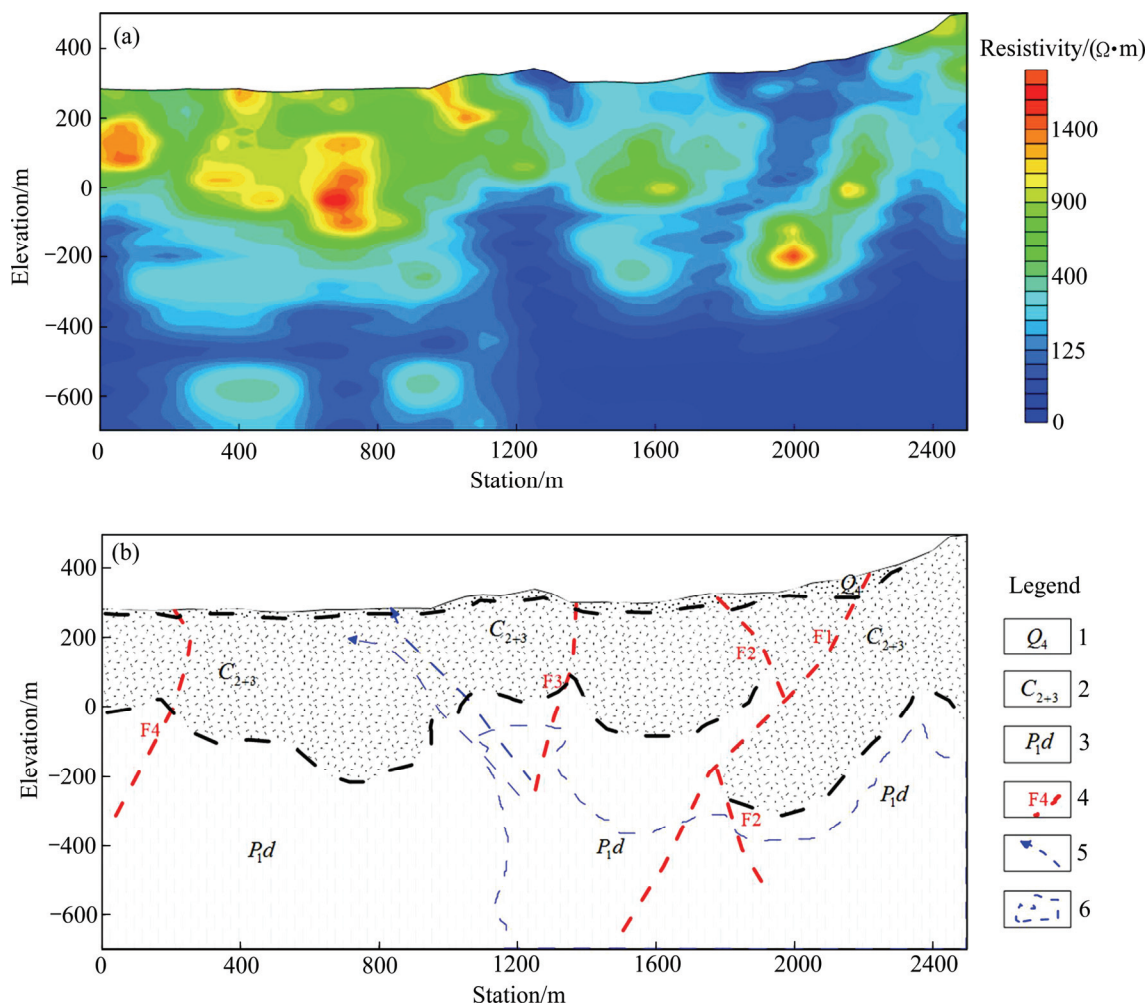


图 14 CSAMT 法勘探 A 线 2D 反演结果及地质解释剖面图: 1—第四系; 2—石炭系白云岩灰岩; 3—二叠系页砂岩; 4—推断断层; 5—推断热流通道; 6—推断热源

Fig. 14 2D inversion result of CSAMT method and geological interpretation profile of line A: 1—Quaternary; 2—Carboniferous limestone dolomite; 3—Permian sandstone; 4—Inferred fault; 5—Inferred heat channel; 6—Inferred heat source

度约 24~26 °C, 冬季温度较高, 为 36~38 °C, 可拟做生产开发井。

4 结论

1) 依据长株潭地区的地层特点和 MT、CSAMT 的基本原理详细推导了层状模型的公式, 根据长株潭地区区内的地层特点设计 8 种典型地层理论模型, 计算出了 CSAMT 相对 MT 在 0.125~8192 Hz 之间正演响应下的 E_p 误差。

2) 以区内株洲市柏市镇温泉调查的探测为实例, 从理论上分析了地电观测系统的正确性, 并对采集的原始数据进行了处理和解释, 在 410.22 m 时打到推断的 F3 断裂破碎带, 温泉水涌出, 最高温度可达 38 °C, 具有开发前景, 证实了本项目具有地质调查研究示范作用。

REFERENCES

- [1] 柳建新, 童孝忠, 郭荣文, 李爱勇, 杨生. 大地电磁测深法勘探—资料处理、反演与解释[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1-211.
LIU Jian-xin, TONG Xiao-zhong, GUO Rong-wen, LI Ai-yong, YANG Sheng. The magnetotelluric sounding prospecting—data processing, inversion and interpretation [M]. Beijing: Science Press, 2012: 1-211.
- [2] 刘春明, 佟铁钢, 何继善. 多种电磁法在某金矿的野外勘探应用[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2422-2429.
LIU Chun-ming, TONG Tie-gang, HE Ji-shan. Exploration of various electromagnetic methods in some gold mine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2422-2429.
- [3] 柳建新, 曹创华, 童孝忠. 矿区强干扰环境下电磁法应用研究与推广研究成果报告[R]. 长沙: 中南大学, 2015: 21-24.
LIU Jian-xin, CAO Chuang-hua, TONG Xiao-zhong. Application of electromagnetic method and dissemination of research results report in noisy environments of mining[R]. Changsha: Central South University, 2015: 21-24.
- [4] ZONGE K L. Introduction to CSAMT: Practical Geophysics II [M]. Tucson: Northwest Mining Association, 1992: 1-6.
- [5] 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 1999: 1-198.
SHI Kun-fa. Controlled source audio magnetotelluric method theory and application[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1999: 1-198.
- [6] PFAFFHUBER A. Development and test of a controlled source MT method in the frequency range 1 to 50 kHz[D]. Berlin: Technical University Berlin, 2001: 10-44.
- [7] 岳瑞永, 徐义贤. 可控源频率域电方位各向异性与近场效应研究[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(3): 342-347.
YUE Rui-yong, XU Yi-xian. Study on electric azimuth anisotropy of controlled source in frequency domain and near-field effects[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(3): 342-347.
- [8] 王若, 王妙月, 卢元林. 高山峡谷区 CSAMT 观测系统研究[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(1): 125-130.
WANG Ruo, WANG Miao-yue, LU Yuan-lin. CSAMT observation system study in high mountain and steep gorge area[J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(1): 125-130.
- [9] 陈明生, 闫述. CSAMT 勘探中场区、记录规则、阴影及场源复印效应的解析研究[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 951-958.
CHEN Ming-sheng, YAN Shu. Analytical study on field zones, record rules, shadow and source overprint effects in CSAMT exploration[J]. Chinese Journal Geophysics, 2005, 48(4): 951-958.
- [10] 林威. CSAMT 法过渡区电磁场的特征[J]. 物探与化探, 2009, 33(2): 148-150.
LIN Wei. Transition region electromagnetic field characteristics of the CSAMT method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 33(2): 148-150.
- [11] 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 Jing-tian, ZHOU Cong, XIAO Xiao. Selection of minimum transmit-receive distance of CSAMT on complicated media[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(6): 1681-1693.
- [12] 曹创华. 东昆仑成矿带典型矿山电(磁)响应特征及成矿模式识别应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2015: 18-87.
CAO Chuang-hua. Applied research of metallogenic pattern recognition and electric (magnetic) response characteristics on typical mine in East Kunlun metallogenic belt, China[D]. Changsha: Central South University, 2015: 18-87.
- [13] 湖南省地质矿产局. 湖南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-121.
Geology and Mineral Resources Bureau of Hunan Province. Hunan province regional geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1-121.
- [14] 陶峰. 湖南宁乡县玉潭镇一带寻找地热的前景分析[J]. 能源与环境, 2011(4): 77-78.
TAO Feng. The prospect analysis of terrestrial heat in Yutan region, Ning-xiang county, Hunan province[J]. Energy and Environment, 2011(4): 77-78.
- [15] 范毅, 徐定芳, 童军. 长株潭沪昆高铁沿线城镇群地质环境综合调查子项目总体设计[R]. 长沙: 湖南省地质调查院, 2015: 1-35.
FAN Yi, XU Ding-fang, TONG Jun. Shanghai-Kunming high-speed rail along the geological environment of urban

- population comprehensive survey subproject overall design in Chang-Zhu-Tan area[R]. Changsha: Hunan Provincial Institute of Geological Survey, 2015: 1–35.
- [16] COGGON J. Electromagnetic and electrical modeling by finite element method[J]. *Geophysics*, 1971, 36: 132–155.
- [17] 何继善. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙: 中南大学出版社, 1998: 1–72.
- HE Ji-Shan. Controlled source audio magnetotelluric method[M]. Changsha: Central South University Press, 1998: 1–72.
- [18] 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: 1–198.
- TANG Jin-tian, HE Ji-shan. Methods and applications of CSAMT[M]. Changsha: Central South University Press, 1998: 1–198.
- [19] WARD S H, HOHMANN G W. Electromagnetic theory for geophysical applications in electromagnetic methods in applied geophysics[J]. *Investigations in Geophysics*, 1988, 1: 1–255.
- [20] 赵广茂, 李志华, 朱旭东, 冯彦谦. 长导线源 CSAMT 一维正演研究[J]. *铁道工程学报*, 2010, 143(8): 21–24.
- ZHAO Guang-mao, LI Zhi-hua, ZHU Xu-dong, FENG Yan-qian. Research on CSAMT 1-D modeling of long wire source[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2010, 143(8): 21–24.

Case study and analysis on distance between transmitter and receiver of CSAMT method in Chang-Zhu-Tan area, China

CAO Chuang-hua^{1,3}, DENG Zhuan¹, LIU Jian-xin^{2,3}

(1. Geology Survey Institute of Hunan province, Changsha 410116, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Key Laboratory of Non-ferrous Resources and Geological Detection,

Ministry of Hunan Province, Changsha 410083, China)

Abstract: The response data of CSAMT method is closely related to transmission distance and measured wave region, which determines its effective exploration depth. Chang-Zhu-Tan area is the important regional and national area, there exist magmata rocks, folds, fracture and with conglomerate, sandstone, mudstone, dolomite, limestone and granite, which is natural prerequisite to use CSAMT method. However, resistivities of most rock are generally low with water system developmentally, and the resistivity of granite is relatively high, this makes different patches be measured to meet the specifications of receiving valid data from the implementation of CSAMT vary. Depending on the rock area in this article, typical of stratum structure consisting of the numerical calculation, the size of the best receiving distance was calculated, for expecting this area or similar area during some reference when CSAMT method detection was used.

Key words: Chang-Zhu-Tan area; CSAMT method; distance between transmitter and receiver; case study

Foundation item: Projects(12120115046901, 12120115043901) supported by the geological survey Bureau of China

Received date: 2016-01-05; **Accepted date:** 2016-05-17

Corresponding author: CAO Chuang-hua; Tel: +86-13787313842; E-mail: 0404050825@163.com

(编辑 王 超)