

doi: 10.11720/wtyht.2021.1186

刘俊峰,程云涛,邓志强,等. CSAMT 与 AMT 数据“拼接”处理——以湖南仁里铌钽矿床 7 号剖面为例[J]. 物探与化探,2021,45(1):68-75. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1186

Liu J F, Chen Y T, Deng Z Q, et al. CSAMT and AMT data "splicing" processing: A case study of No. 7 profile of the Renli niobium tantalum deposit in Hunan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1): 68-75. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1186

CSAMT 与 AMT 数据“拼接”处理 ——以湖南仁里铌钽矿床 7 号剖面为例

刘俊峰¹, 程云涛¹, 邓志强¹, 周芳春², 曹创华³, 刘翔⁴,
曾美强², 李杰⁵, 黄志彪², 陈虎²

(1. 湖南省核工业地质调查院, 湖南长沙 410011; 2. 湖南省核工业地质局 311 大队, 湖南长沙 410100; 3. 湖南省地质调查院, 湖南长沙 410011; 4. 湖南省生态环境事务中心, 湖南长沙 410014; 5. 湖南省地质院, 湖南长沙 410014)

摘要: 音频大地电磁测深 (AMT) 与可控源音频大地电磁测深 (CSAMT) 均为深部勘查常用方法。AMT 方法采集频带较宽, 但存在“死频带”, 在“死频带”范围无法完全得到地质体响应。CSAMT 信噪比高, 但通常受发射功率的限制, 收发距离一般放置不够远, 容易过早进入“近区”。本文展示了将两种方法数据拼接组合的一种处理方式: 首先在前人理论研究的基础上, 利用 CSAMT 和 AMT 均匀半空间模型进行了正演计算, 结果表明, CSAMT 远区与 AMT 数据拼接具有可行性; 选择湖南仁里铌钽矿床 7 号剖面的野外实测数据进行实验, 将同测点位置的 CSAMT 远区数据和 AMT 同测点同模式数据相“拼接”, 合成新 AMT 数据; 最后进行反演, 反演结果与钻探结果对应较好, 表明该方法具有一定的效果。

关键词: 音频大地电磁测深; 可控源音频大地电磁测深; 数据拼接; 幕阜山岩体

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)01-0068-08

0 引言

AMT 方法为音频段 MT 方法, 通常使用的频率范围在 0.01~10 000 Hz, 勘探深度可达数千米 (通常为 2 km 以浅)。AMT 方法数据质量与高空大地电磁活动强弱有直接联系, 北半球通常表现为夏强冬弱, 夜强日弱, 且一般在 1~4 kHz 频带天然场信号强度通常很低, 容易造成阻抗畸变, 通常将这个频带称为“死频带”^[1-2]。针对死频带干扰, A. Müller 提出采用避开白天信号弱时段在夜间采集减小死频带干扰^[3]; Gamble T 等提出了用于改进采集点数据质量的远参考法^[4], 可以在一定程度上减小畸变曲线,

但通常参考点也受死频带影响, 导致效果不佳; 杨生和仇根根等提出相位校正法^[5-6], 该方法要求相位质量相对较好, 目前实际运用较少; Garcia X 和 Jones A G 提出采用连续小波变换的处理方法, 但容易出现离散^[7]; 李红领等通过删除不满足相关度的时间序列去噪减小死频带干扰^[8], 取得一定效果, 但是时间序列的删选需要有一定的时间序列长度, 否则处理效果将会受到影响。人工剔除飞点圆滑曲线也是“死频带”校正常用的方法^[9], 但该方法通常人为影响很大, 人工调整的畸变曲线不能真实反映实际情况。谭捍东等用 Rhoplus 校正方法处理大地电磁测深数据^[10]; 汤井田等和谭洁用 Rhoplus 校正方法处理校正“死频带”取得了较好的效果^[11-13]; 在

收稿日期: 2020-04-21; **修回日期:** 2020-07-29

基金项目: 湖南省重点领域研发计划项目 (2019SK2261); 国家重点研发计划 (2017YFC0602402); 湖南省地勘基金项目 (20170331); 湖南省自然资源厅科研项目 (2018-02, 2018-04); 湖南省核工业地质局科技开发项目 (KY2019-DDY-01)

作者简介: 刘俊峰 (1986-), 男, 工程师, 主要从事地质勘查与研究。Email: bgmaster@163.com

通讯作者: 程云涛 (1986-), 男, 高级工程师, 主要从事地球物理勘探工作。Email: 674395052@qq.com

改进观测方式方面,Garcia 和 Jones 提出的 T-MT 法为一种基于大地电流法(TT)和电流—电磁法(T-MT)相结合的一种混合数据获取与处理方法^[14];乔宝强等展示了 EH4 仪器自带的场源增强信号的实例效果^[15]。

CSAMT 是利用人工场源的 AMT 方法,通过控制收发信号,能有效抑制噪声,减少“死频带”干扰。该法实际运用较多,但目前国内大部分仪器(GDP-32 与 V8)发射功率有限,收发距常设置偏小,频率进入近区过早,导致探测深度有限。针对近区校准,不少学者做了工作,但很少运用到实际数据处理当中,CSAMT 的解释处理大多数情况下仍然是基于“远区”进行^[16-17]。因此,如能结合 AMT 与 CSAMT 各自优点,则有可能达到减少“死频带”干扰提高数据质量之目的。

已有数据表明,CSAMT 的远区数据与 AMT 具有相似性,同测点的曲线形态基本一致^[18],CSAMT 的远区数据与 AMT 数据拼接具可行性。本文通过均匀模型模拟计算证实上述两种方法响应数据拼接是可行的。以湖南仁里钨钽矿床 7 号剖面采集的 CSAMT 和 AMT 数据为例,展示了这种“拼接”的方法处理过程:将 CSAMT 近区和过渡带数据删除,同时将 AMT 中“死频带”畸变数据剔除,将两者拼接,经过静校正等数据处理后进行反演。与地质勘探剖面对比,表明这种数据处理方式对地电断面的浅层显示有一定的改善,且深部地电信息有更丰富的展示。

1 基本理论与数值模拟

1.1 基本理论

采用直角坐标系时,CSMAT 远区各分量如下^[19]:

$$\mathbf{E}_x = \mathbf{E}_r \cos \varphi - \mathbf{E}_\varphi \sin \varphi = \frac{I \rho d L}{2 \pi \gamma^3} (1 - 3 \sin^2 \varphi), \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_y = \mathbf{H}_r \sin \varphi + \mathbf{H}_\varphi \cos \varphi = \frac{-I \rho d L e^{-i \frac{\pi}{4}}}{2 \pi \sqrt{\sigma \mu \omega} r^3} e (1 - 3 \sin^2 \varphi), \quad (2)$$

$$|Z| = \left| \frac{\mathbf{E}_x}{\mathbf{H}_y} \right| = \sqrt{\rho \mu \omega}, \quad (3)$$

则视电阻率可以表示为:

$$\rho = \frac{|\mathbf{E}_x|^2}{\mu f |\mathbf{H}_y|^2} = \frac{|\mathbf{E}_x|^2}{2 \pi \mu f |\mathbf{H}_y|^2}, \quad (4)$$

$$\text{或: } \rho = \frac{|\mathbf{E}_x|^2}{5f |\mathbf{H}_y|^2}. \quad (5)$$

式(5)也为 AMT 定义视电阻率公式。当收发距达到一定“足够”距离时,CSAMT 远区数据与 MT 的偏差较小,可以近似等同^[20-21]。

1.2 数值模拟

为了符合实际地层信息,曹创华等结合长株潭地区地层特点,进行了 CSAMT 收发距等相关实测参数的理论计算和实例分析^[22],得到了较好的结论。本文借鉴其思路,结合笔者团队在湘东北幕阜山仁里矿区实际观测的参数,设计 CSAMT 正演采用赤道偶极,收发距为 5 000 m,电偶极源长为 1 000 m,接收点在中垂线上,正演频率为野外数据采集常用频率。

理论模拟计算采用均匀半空间电阻率模型,电阻率为 2 000 $\Omega \cdot \text{m}$,采集频点共 55 个:分别为 10 400、8 800、7 200、6 000、5 200、4 400、3 600、3 000、2 600、2 200、1 800、1 500、1 300、1 100、900、780、640、530、460、390、320、265、229、194、159、132、115、97、79、66、57、49、40、33、27.5、22.5、18.8、16.2、13.7、11.2、9.4、8.1、6.9、5.6、4.7、4.1、3.4、2.81、2.34、2.03、1.72、1.41、1.17、1.02、0.86 Hz。按照式(1~5)进行计算,得到正演模拟结果如图 1 所示。由图可见,CSAMT 数据大于 800 Hz 为远区,AMT 和 CSAMT 数据在远区电阻率与相位数值基本接近,误差较小,表明两种方法数据拼接具有可行性。

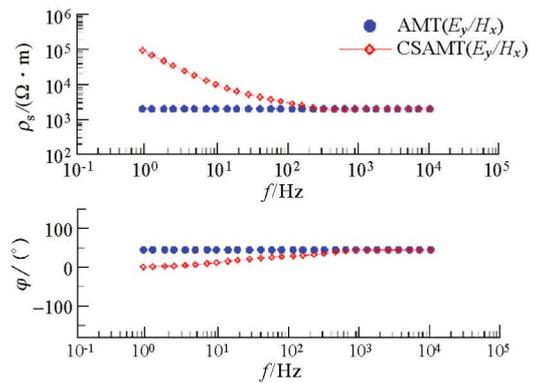


图 1 理论模拟计算曲线

Fig. 1 Theoretical simulation calculation curve

2 实例验证

2.1 地质概况

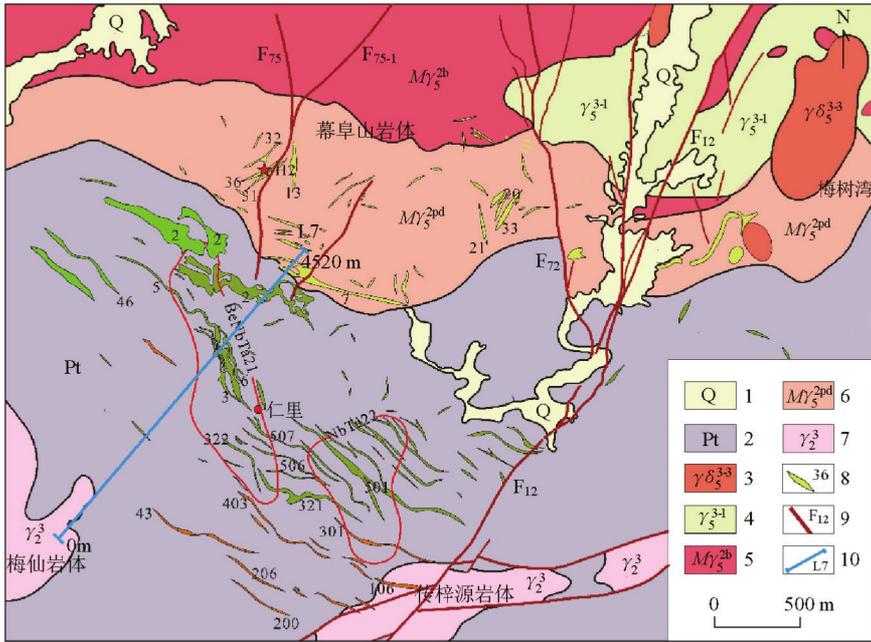
实例数据在湖南仁里钨钽矿床 7 号剖面取得。该矿床为近年来华南地区发现的超大型、高品位花岗伟晶岩型钨钽矿,为我国华南地区新发现的超大

型高品位花岗伟晶岩型铌钽矿,被评为2017年全国十大地质找矿成果之一。该矿床位于扬子陆块与华夏陆块交汇之江南隆起造山带中段北缘之湘东北断隆带,扬子陆块与华夏陆块的过渡部位,幕阜山岩体西南缘。区域上出露地层有青白口系、震旦系、寒武系、白垩系和第四系。矿区主要出露地层为冷家溪群,属于扬子陆块变质褶皱基底,为一套浅变质碎屑岩系,以片岩为主。区域构造表现为褶皱基底构造与盖层组成近东西向褶皱构造,断裂构造为燕山运动形成的NNE、NE向断裂构造^[23-24]。

区内岩浆活动频繁,南部和东南部出露的雪峰期梅山岩体,梅仙岩体、三墩岩体、传梓源岩体和幕阜山岩体,其中以北面燕山期侵入为主的幕阜山大型复式岩体体量最大,产出面积为2360 km²^[25]。矿区地质简图见图2。

区内花岗质伟晶岩脉发育,主要呈脉状体产出于幕阜山复式岩体及其围岩冷家溪群片岩中,富含铌钽矿化的伟晶岩脉主要产于距离岩体接触带0.2~2 km范围内的冷家溪群片岩中。典型的2、3、5、6号脉走向总体呈NW向平行,倾向南西,规模大,其资源量占矿区Ta₂O₅资源量的97%,其中又以5号伟晶岩脉铌钽资源量最为显著,5号矿脉中的3个矿体(5₋₁,5₋₂,5₋₃)中Ta₂O₅资源量占全矿区Ta₂O₅资源量的67%^[26-27]。

根据小比例尺航空磁测的研究推断^[28-29],幕阜山岩体西南缘(包含仁里段)存在隐伏磁性岩体,对中低温热液型多金属矿及与岩体相关的稀有金属矿产较为有利。相关研究^[30-33]表明,含矿伟晶岩与花岗岩关系密切。



1—第四系;2—冷家溪群片岩;3—细粒花岗闪长岩;4—细粒二云母二长花岗岩;5—中粒似斑状黑云母二长花岗岩;6—粗中粒片麻状黑云母二长花岗岩;7—新元古代中细粒黑云母斜长花岗岩;8—伟晶岩脉及其编号;9—主要断裂及编号;10—物探测线及编号
 1—Quaternary alluvium; 2—Lengjiaxi group schist; 3—fine-grained granodiorite; 4—fine-grained two-mica porphyritic biotite monzogranite; 5—medium-grained porphyritic biotite monzogranite; 6—medium-grained gneissic biotite monzogranite; 7—Neoproterozoic two-mica plagioclase granite; 8—pegmatite and its serial number; 9—main faults and its serial number; 10—measuring line and serial number

图2 矿区地质与测线布置^[24]

Fig. 2 Layout of geology and survey line in the mining area^[24]

2.2 地球物理特征

矿区地层以冷家溪群浅变质碎屑岩系为主,主要为片岩,第四系在溪沟附近地表少量分布,厚度普遍较小。矿区北东为幕阜山岩体,南西为梅仙岩体。伟晶岩脉赋存于幕阜山复式岩体及其围岩冷家溪群片岩中。物性参数测试根据《湖南省区域地质志》相关物性参数^[34],并经地表对称小四极和岩心

标本测试验证取得:第四系电阻率最低,为10~30 Ω·m;板溪群、冷家溪群变质片岩的电阻率为20~10⁴ Ω·m,大部分介于800~1500 Ω·m之间。绝大部分伟晶岩和花岗岩电阻率接近,无统计学上明显差别,电阻率为中高阻—高阻,电阻率区间为10²~10⁶,大部分介于10³~10⁴之间,但值得注意的是少部分变质程度较深的变质岩与花岗岩(伟晶岩)

电阻率接近。地表风化严重的伟晶岩和花岗岩(松散状)物性接近第四系电阻率。

矿区地质—地球物理特征与四川甲基卡锂矿田伟晶岩脉具有可类比性,即稀有金属矿床含矿体密度低而电阻率高,变质岩围岩电阻率低导电性高的特点。利用伟晶岩与围岩(片岩)之间电阻率的差异可指导找矿^[35-36]。仁里矿区围岩为变质岩,含矿地质体为花岗质伟晶岩,具有开展电磁探测的前提条件,即可借助地电探测区分中低阻的片岩和中高阻的伟晶岩(或花岗岩)。

2.3 工作布置

针对典型剖面勘探 7 线进行了物探测线布置,物探测线与地质勘探剖面线重合,同时垂直于伟晶岩脉走向,测线方位角为 40°。定义测线方向为 y 方向,垂直 y 方向为 x 方向,CSAMT 观测方式为 E_y/H_x 模式(本测区为 TM 模式),AMT 的 E_y/H_x 模式与 CSAMT 的 E_y/H_x 模式电磁道数据方向一致。CSAMT 采用 GDP-32 仪器进行采集,仪器采用电偶极源,发射偶极子长 1 000 m,发射机功率为 10 kW,发射频率为 8 192~1 Hz,收发距约 5 000 m,采集时间为 2018 年 5 月。AMT 采用 V8 多功能电法工作站,采用矢量观测方式,观测时长为 30~45 min,野外施工时间为 2019 年 8~10 月白天,根据已有资料,该段时间为北半球信号天然电磁场信号弱的时段,容易造成“死频带”干扰。AMT 起点位置为 0 m,终点位置为 4 520 m,起点和终点位置均与岩体相接,起点为梅仙岩体,终点为幕阜山岩体;CSAMT 测量位置与 AMT 测点在 1 600~4 400 m 段为重合位置,两种方法点距和极距均为 40 m。测线布置见图 2。

2.4 实测 CASMT 与 AMT 典型曲线特征

实测 CSAMT 由于收发距短,且由于该区地下整体电阻率较高,信噪比较高,曲线整体较圆滑,大部分曲线在 1 200 Hz 开始进入过渡带(图 3)。取平均电阻率为 2 000 $\Omega \cdot m$,可得勘探深度约为 500 m。

AMT 曲线整体质量较好,大部分测点在 500~5 000 Hz 频段, ρ_{xy} 和 ρ_{yx} 均出现视电阻率曲线畸变的趋势^[11],主要表现为曲线不光滑,曲线鲁棒性变差。阻抗相位曲线在该频段亦出现不光滑现象。在功率谱上表现为该频段信号强度低,考虑为该段天然场信号弱,以 2 360 m 测点为例,实测曲线见图 4。

2.5 拼接方法

数据拼接采用同测点拼接方式,步骤如下:

1) 取 CSAMT 远区数据,将过渡带和近场区数据剔除。

2) 将 AMT E_y/H_x 模式死频带数据去除。

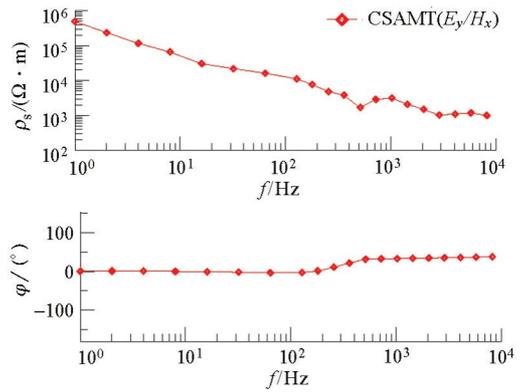


图 3 2 360 m 测点处 CSAMT 电阻率与相位曲线

Fig. 3 Resistivity and phase curves of CSAMT at 2360 m

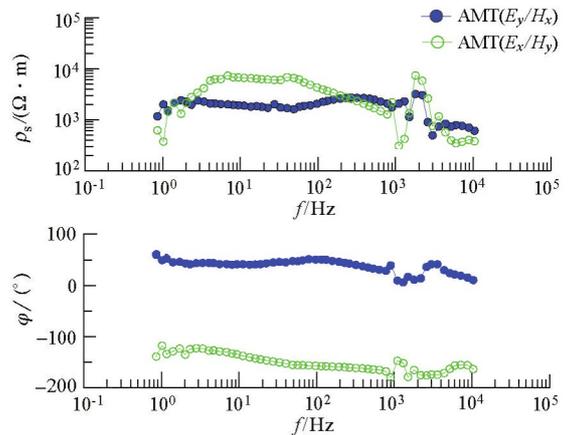


图 4 2 360 m 测点处 AMT 电阻率与相位曲线

Fig. 4 Resistivity and phase curves of AMT at 2360 m

3) 将编辑后的 CSAMT ρ_{yx} 与编辑后同方向的 AMT 数据 ρ_{yx} 数据拼接,相位拼接方式相同。

4) 静态校准:因多种因素影响,比如地形起伏、场源效应,数据采集时间段不同(地表岩土干湿状态不同)接地电阻不一致,CSAMT 部分测点远区视电阻率与 AMT 相比呈现整体偏大或偏小情况,对此,可以整体平移到大体一致,然后进行 5 点滤波校准。

5) 数据插值:本次 CSAMT 远区数据大部分为 1 200~9 000 Hz 频率段,而 AMT“死频带”主要集中在 500~5 000 Hz 频率段,因此 E_y/H_x 模式方向数据拼接后可能仍然存在一定的数据空白段(如 500~1 200 Hz),可以适当用插值来解决。这时可以使用 E_y/H_x 模式数据进行反演(本次为 TM 模式)。

为了更加有效利用 AMT E_x/H_y 模式数据,AMT E_x/H_y 模式“死频带”数据结合 E_x/H_y 模式曲线形态及同频段 E_x/H_y 模式数据进行人工调整编辑,使曲线较光滑,此段数据调整主要根据经验判断。拼接后数据示例见图 5,可以看出,拼接后数据形态整体

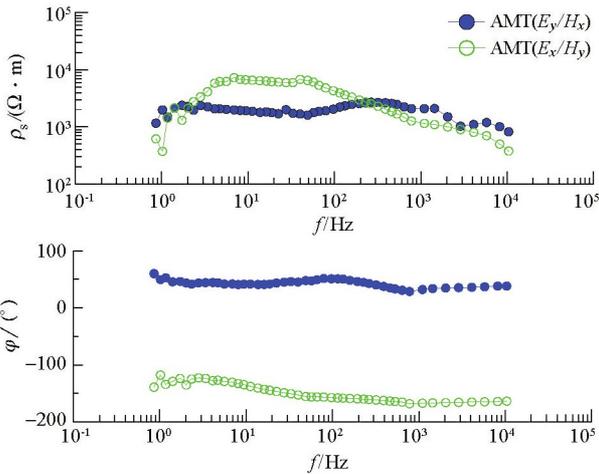


图5 2360 m 测点处数据拼接曲线

Fig. 5 Data splicing curve at 2360 m measuring point

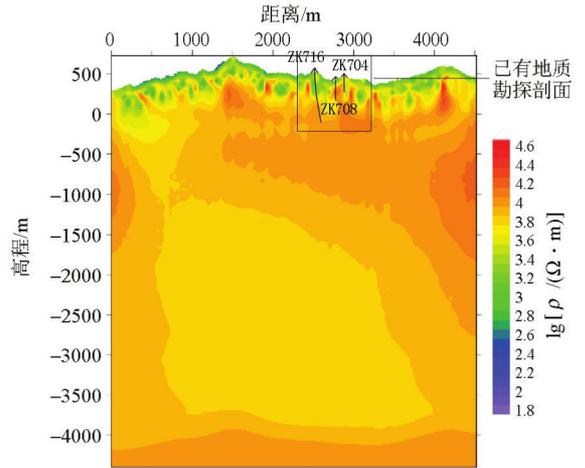


图6 7线拼接数据反演结果

Fig. 6 Inversion diagram of line 7 mosaic data

较好,较有效地减少了“死频带”的干扰。

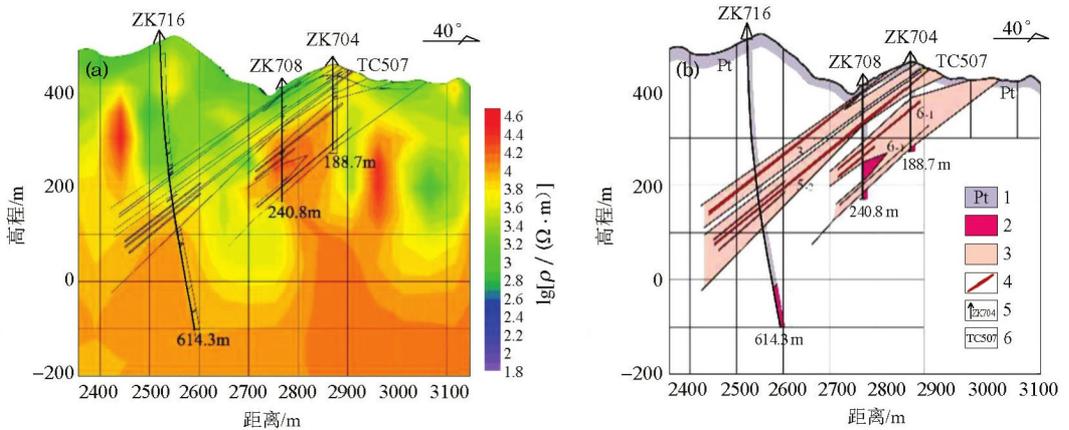
2.6 反演成果及地质解释

最大探测深度按照 $356\sqrt{\rho/f}$ 估计,其中 ρ 取 $2000 \Omega \cdot m$, AMT 数据大部分到 10 Hz 左右仍然有较好的离差,取最低频率为 8 Hz,则可得探测深度约 5000 m。拼接后的数据采用 2D 反演 ($E_x/H_y + E_y/H_x$, 亦 TE+TM)。反演成果图见图 6。

地电成果剖面整体展现为中高阻—高阻,浅地表电阻率较低,深部电阻率大于地表。在剖面起始端 0~300 m 和 4000~4520 m 段电阻率呈现高阻,并往深部延伸,分别对应梅仙岩体和幕阜山岩体。300~4000 m 段电阻率总体可分为低—高一低—高结构;剖面标高 0~500 m 深度,浅地表为低阻,对应于

片岩;中间深度有数十个向上延伸的“脉状”高阻侵入体,推测为侵入伟晶岩花岗岩;伟晶岩表现为中低阻,推测为 Pt 板溪群片岩并夹杂有伟晶岩(花岗岩)通道。

其中 2500~3000 m 段位置,“脉状”高阻与已知勘探剖面(图 7)有一定的对应关系:ZK716、ZK708、ZK704 的片岩,对应于剖面的中低阻,伟晶岩与花岗岩对应于地电剖面的中高阻。伟晶岩在反演图上分辨不明显,体现在高低阻的接触过渡带上。结合上面物性参数分析可知伟晶岩与花岗岩物性参数相近,无法区别,但结合地质解释,可以大致判别片岩与岩脉的界线;根据如图 7b 所示勘查成果^[23],AMT 与 CSAMT 数据拼接处理后对应的地电剖面如图 7a



1—冷家溪群片岩;2—花岗岩;3—伟晶岩脉及其编号;4—矿体及编号;5—钻孔及编号;6—槽探及编号

1—Lengjiaxi group schist; 2—granites; 3—pegmatite and its numbered; 4—ore body and its numbered; 5—drilling engineering and its numbered; 6—pit engineering and its numbered

图7 7线已有钻孔段地电剖面(a)和地质勘探剖面(b)^[23]

Fig. 7 Geoelectric profile of drilling verification section (a) and geological exploration section (b) of line 7^[23]
万方数据

所示。可见拼接处理后地电剖面能较好地呈现伟晶岩(或花岗岩)形态,对该区勘查工作有较大的指导意义。

3 结论与讨论

本文从已有理论出发,分析了 CSAMT 与 AMT 数据拼接进行数据处理反演的正确性,表明 CSAMT 远区数据与 AMT 数据拼接是可行的。在实例上展示了数据拼接处理的过程和处理后的反演效果,利用在仁里 7 号勘探剖面采集的 CSAMT 与 AMT 数据,对 AMT 数据“死频带”数据去除和 CSAMT 近区数据剔除后拼接,通过静校正等处理手段后反演取得了较好的效果,在浅部地质体对照和深部岩体探测方面均取得效果,表明该组合方法既结合了 CSAMT 浅层分辨率较高,AMT 勘探深度大的优点,同时不受 AMT“死频带”和 CSAMT 近区干扰的影响。

值得注意的是,受场源效应(CSAMT 法)、收发距(CSAMT 法)、地形(CSAMT 法和 AMT 法)等影响,实际数据与 AMT 仍然存在一定的偏差,因此实际数据处理过程中需要认真分析数据造成偏差的原因后进行处理,避免“硬拼接”。

参考文献(References):

- [1] Jones A C, Garcia X. Okak Bay AMT data-set case study: Lessons in dimensionality and scale [J]. *Ueophysics*, 2003, 68 (1): 70 - 91.
- [2] Ritter S S. High frequency MT data understanding "dead band" between 1 and 4 kHz [C]//22nd EM Induction Workshop. Weimar, Uermany, 2014.
- [3] Müller A. A new method to compensate for bias in magnetotellurics [J]. *Geophysical Journal International*, 2000, 142 (1): 257 - 269.
- [4] Gamble T, Goubau W M, Clarke J. Magnetotellurics with a remote magnetic reference [J]. *Geophysics*, 1979, 44 (1): 53 - 68.
- [5] 杨生, 张少云. MT 法中利用阻抗相位资料对畸变视电阻率曲线的校正 [J]. *地质与勘探*, 2001, 37 (6): 42 - 45.
Yang S, Zhang S Y. Correction of distorted apparent resistivity curve using impedance phase data in MT method [J]. *Geology and exploration*, 2001, 37 (6): 42 - 45.
- [6] 仇根根, 钟清, 刘君平, 等. 大地电磁测深视电阻率和相位曲线之间近似互算方法及程序实现 [J]. *物探化探计算技术*, 2012, 34 (4): 402 - 405.
Qiu G G, Zhong Q, Liu J P, et al. Approximate mutual calculation method and program realization between apparent resistivity and phase curve in magnetotelluric sounding [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 34 (4): 402 - 405.
- [7] Garcia X, Jones A G. Robust processing of magnetotelluric data in the AMT dead band using the continuous wavelet transform [J]. *Geophysics*, 2008, 73 (6): 223 - 234.
- [8] 李红领, 王光杰, 杨磊, 等. 基于蒙古东戈壁 AMT 数据的“死频带”分析 [J]. *地球物理学进展*, 2015, 34 (6): 1188 - 1198.
Li H L, Wang G J, Yang L, et al. Dead band analysis based on Mongolian east gobi AMT data [J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 34 (6): 1188 - 1198.
- [9] 李凤哲, 李伟, 朱庆俊. 咸淡水共存区物探资料处理技术 [J]. *物探与化探*, 2011, 35 (5): 692 - 695.
Liu F Z, Li W, Zhu Q J. A discussion on data processing for geophysical exploration in the salt-fresh water concomitant area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35 (5): 692 - 695.
- [10] 谭捍东, 魏文博. 大地电磁标定曲线的畸变及校正 [J]. *现代地质*, 1998, 12 (4): 603 - 606.
Tan H D, Wei W B. Distortion of magnetotelluric calibration curve and its correction [J]. *Geoscience*, 1998, 12 (4): 603 - 606.
- [11] 汤井田, 周聪. AMT“死频带”数据频域特征与 Rhoplus 校正 [C]//第七届世界华人地质科学研讨会摘要集, 2013: 226 - 227.
Tang J T, Zhou C. Frequency domain characteristics of AMT “dead band” data and rhoplus correction [C]//Abstracts of the 7th World Symposium on Chinese Geological Sciences, 2013: 226 - 227.
- [12] 周聪, 汤井田, 任政勇, 等. 音频大地电磁法“死频带”畸变数据的 Rhoplus 校正 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58 (12): 4668 - 4660.
Zhou C, Tang J T, Ren Z Y, et al. Rhoplus correction of “dead band” distortion data of audio frequency magnetotelluric method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58 (12): 4668 - 4660.
- [13] 谭洁. Rhoplus 理论及 AMT 死频带校正 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
Tan J. The theory of Rhoplus and correction of dead band data [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [14] Garcia X, Jones A G. A new methodology for the acquisition and processing of audio-magnetotelluric (AMT) data in the AMT dead band [J]. *Geophysics*, 2005, 70 (5): 119 - 126.
- [15] 乔宝强, 程纪星, 刘祐. AMT 野外最佳观测时间及人工源信号作用的探讨 [J]. *铀矿地质*, 2014, 30 (3): 180 - 186.
Qiao B Q, Cheng J X, Liu H. Discussion on the best acquisition season of AMT and man-made signals function in the field [J]. *Uranium Geology*, 2014, 30 (3): 180 - 186.
- [16] 王若, 王妙月. 可控源音频大地电磁数据的反演方法 [J]. *地球物理学进展*, 2003, 18 (2): 197 - 202.
Wang R, Wang M Y. Inversion method of controlled source audio-frequency magnetotelluric data [J]. *Progress in Geophysics*, 2003, 18 (2): 197 - 202.
- [17] 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): 4148 - 4159.
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): 4148 - 4159.
- [18] 邓居智, 郑燕青, 陈辉, 等. 多种频率域电磁法在冷水坑矿集区的应用效果对比 [J]. *地球物理学进展*, 2016, 31 (6): 166 -

- 176.
- Deng J Z, Zheng Y Q, Chen H, et al. Comparison of application effects of multiple frequency domain electromagnetic methods in Lengshuikeng ore concentration area [J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(6): 166 - 176
- [19] 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.
- Tang J T, He J S. *Methods and applications of CSAMT*[M]. Changsha: Central South University Press, 2005.
- [20] 汤井田,周聪,肖晓.复杂介质条件下CSAMT最小收发距的选择[J].*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 on complicated media[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(6): 1681 - 1693.
- [21] 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, et al. 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.
- [22] 曹创华,邓专,柳建新.长株潭地区CSAMT法收发距探讨及实例分析[J].*中国有色金属学报*, 2017, 27(2): 345 - 355.
- Cao C H, Deng Z, Liu J X. Case study and analysis on distance between transmitter and receiver of CSAMT method in Changzhutan area, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(2): 345 - 355.
- [23] 刘翔,周芳春,黄志彪,等.湖南平江县仁里超大型伟晶岩型钨钼多金属矿床的发现及其意义[J].*大地构造与成矿学*, 2018, 38(2): 161 - 166.
- Liu X, Zhou F C, Huang Z B, et al. Discovery of Renli superlarge pegmatite-type Nb-Ta polymetallic deposit in Pingjiang, Hunan province and its significances [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 38(2): 161 - 166.
- [24] 周芳春,李建康,刘翔,等.湖南仁里钨钼矿床矿体地球化学特征及其地质意义[J].*地质学报*, 2019, 93(6): 1392 - 1404.
- Zhou F C, Li J K, Liu X, et al. Geochemical characteristics and genetic significance of ore bodies in Renli Nb-Ta deposit, Hunan province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1392 - 1404.
- [25] 束正祥,张德贤,鲁安怀,等.湘东北幕阜山岩体地质地球化学特征及其找矿指示意义[J].*矿物学报*, 2015, 35(S1): 240.
- Shu Z X, Zhang D X, Lu A H, et al. Geological and geochemical characteristics of Mufushan pluton in Northern Hunan province and its prospecting significance [J]. *Acta mineralogica Sinica*, 2015, 35(S1): 240.
- [26] 周芳春,刘翔,李建康,等.湖南仁里超大型稀有金属矿床的成矿特征与成矿模型[J].*大地构造与成矿学*, 2019, 43(1): 77 - 166.
- Zhou F C, Liu X, Li J K, et al. Metallogenic characteristics and prospecting direction of Renli super large rare metal deposit in Hunan Province, China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2019, 43(1): 77 - 166.
- [27] 刘翔,周芳春,李鹏,等.湖南仁里稀有金属矿田地质特征、成矿时代及其找矿意义[J].*矿床地质*, 2019, 38(4): 771 - 791.
- Liu X, Zhou F C, Li P, et al. Geological characteristics and metallogenic age of Renli rare metal orefield in Hunan and its prospecting significance[J]. *Mineral Deposits*, 2019, 38(4): 771 - 791.
- [28] 崔志强,胥值礼,孟庆敏.高精度航空物探在幕阜山地区地质构造研究中的应用[J].*华南地质与矿产*, 2015, 31(4): 391 - 397.
- Cui Z Q, Xu Z L, Meng Q M. The application of high precision airborne geophysical research in Mufu mountain area [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2015, 31(4): 391 - 397.
- [29] 崔志强,胥值礼,孟庆敏.幕阜山及邻区地质构造及岩浆岩之航空地球物理特征[J].*物探化探计算技术*, 2016, 38(2): 161 - 166.
- Cui Z Q, Xu Z L, Meng Q M. Aerogeophysical feature of the geological tectonic and magmatic rocks in the mufu-mountain area[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 38(2): 161 - 166.
- [30] 李鹏,刘翔,李建康,等.湘东北仁里—传梓源矿床5号伟晶岩岩相学、地球化学特征及成矿时代[J].*地质学报*, 2019, 93(6): 1374 - 1391.
- Li P, Liu X, Li J K, et al. Petrographic and geochemical characteristics of Renli-Chuanziyuan No. 5 pegmatite, NE Hunan, and its metallogenic age[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1374 - 1391.
- [31] 李鹏,李建康,裴荣富,等.幕阜山复式花岗岩体多期次演化与白至纪稀有金属成矿高峰:年代学依据[J].*地球科学*, 2017, 42(10): 1684 - 1696.
- Li P, Li J K, Pei R F, et al. Multistage magmatic evolution and cretaceous peak metallogenic epochs of Mufushan composite granite Mass: Constrains from geochronological evidence [J]. *Earth Science*, 2017, 42(10): 1684 - 1696.
- [32] 周芳春,黄志彪,刘翔,等.湖南仁里钨钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J].*大地构造与成矿学*, 2020, 44(3): 476 - 485.
- Zhou F C, Huang Z B, Liu X, et al. Re-Os dating of molybdenite from the Renli Nb-Ta deposit, Hunan province, and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2020, 44(3): 476 - 485.
- [33] 李乐广,王连训,田洋,等.华南幕阜山花岗伟晶岩的矿物化学特征及指示意义[J].*地球科学*, 2019, 44(7): 611 - 618.
- Li L G, Wang L X, Tian Y, et al. Petrogenesis and rare-metal mineralization of the Mufushan granitic pegmatite, South China: Insights from in situ mineral analysis [J]. *Earth Science*, 2019, 44(7): 611 - 618.
- [34] 湖南省地质调查院.湖南省区域地质志[M].北京:地质出版社,2012:850 - 852.
- Hunan Institute of Geological Survey. *Regional geological records of Hunan Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 850 - 852.
- [35] 刘丽君,付小方,王登红,等.甲基卡式稀有金属矿床的地质特征与成矿规律[J].*地质与矿产*, 2015, 34(6): 1188 - 1198.
- Liu L J, Fu X F, Wang D H, et al. Geological characteristics and metallogeny of Jiajika-type rare metal deposits[J]. *Mineral Depos-*

its, 2015, 34(6): 1188 - 1198.

[36] 杨荣, 郝雪峰, 王登红, 等. 四川甲基卡锂矿田伟晶岩脉的地球物理探测效果——以新三号脉(X03)为例[J]. 矿床地质, 2020, 39(1): 111 - 125.

Yang R, Hao X F, Wang D H, et al. Effect of geophysical exploration on the pegmatite vein in Jiajika lithium orefield, Sichuan province: A case study of X03 vein[J]. Mineral Deposits, 2020, 39(1): 111 - 125.

CSAMT and AMT data "splicing" processing: A case study of No. 7 profile of the Renli niobium tantalum deposit in Hunan Province

LIU Jun-Feng¹, CHEN Yun-Tao¹, DENG Zhi-Qiang¹, ZHOU Fang-Chun², CAO Chuang-Hua³,
LIU Xiang⁴, ZENG Mei-Qiang², LI Jie⁵, HUANG Zhi-Biao², CHEN Hu²

(1. Hunan Nuclear Geology Institute, Changsha 410011, China; 2. No. 311 Geological Party of Hunan Nuclear Geology, Changsha 410100, China; 3. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410011, China; 4. Hunan Eco-environmental Affairs Center, Changsha 410014, China; 5. Geological Bureau of Hunan Province, Changsha 410014, China)

Abstract: Generally, audio frequency magnetotelluric sounding (AMT) and controlled source audio frequency magnetotelluric sounding (CSAMT) are used for deep exploration. The AMT method has a relatively wide acquisition frequency band, but is affected by weak signals in certain frequency bands of the natural field, which is called "dead band". In the "dead band" range, the geological body response cannot be obtained completely. However, CSAMT has the characteristics of high signal-to-noise ratio due to the introduction of artificial source; therefore, due to the limitation of transmitting power, the distance between transmitting and receiving is generally not far enough, so it is easy to enter the "near area" prematurely. This paper proposes a processing method that combines the two methods of data splicing. Firstly, on the basis of previous theoretical research, the forward calculation is carried out by using CSAMT and AMT uniform half space model, and the results show that the combination of CSAMT and AMT data is feasible. Secondly, the field measured data of No. 7 geological section of the Renli niobium and tantalum deposit in Hunan Province are tested by using the CSAMT far area data and the AMT data at the same measuring point with the same mode to "splice". Finally, the new AMT data derived from synthesization are used. The results show that the inversion results and the drilling results correspond well, which proves that the method has good promotion significance.

Key words: AMT; CSAMT; data processing; Mufu Mountain rock mass

(本文编辑:沈效群)