

MATLAB 在 CSAMT 数据全区视电阻率 求取中的应用

李能勇, 刘春超

(安徽省地勘局第一水文工程地质勘察院, 蚌埠 233000)

摘要: CSAMT 在其标量测量模式下, 野外采集数据存在“近场效应”, 数据产生畸变。为了快速、有效地对“过渡区”和“近区”数据进行校正, 达到消除“近场效应”, 增加勘探深度的目的, 利用 MATLAB 作为编程计算工具, 直接利用实测的卡尼亚视电阻率和对应的少量测量参数, 从卡尼亚视电阻率公式出发, 采取正演迭代方法求取全区视电阻率, 并给出了计算程序代码。验算结果表明, 该正演迭代计算方法求取全区视电阻率, 实现“近场效应”校正效果显著, 并且具有较高运算精度和速度, 程序代码可直接作为处理 CSAMT 实测数据的工具。

关键词: CSAMT; MATLAB; 全区视电阻率; 卡尼亚电阻率

中图分类号: P631 **文献标识码:** A

APPLICATION OF MATLAB IN CALCULATING THE ALL-TIME APPARENT RESISTIVITY OF CSAMT DATA

LI Neng-yong, LIU Chun-chao

(The First Institute of Hydrology and Engineering Geological Prospecting of Anhui Geological
Prospecting Bureau, Bengbu 233000, China)

Abstract: Under the scalar measurement mode of CSAMT, there is a “near-field effect” in the data collected in the field, which generates distortion in the data. In order to quickly and effectively correct the data in the “transition zone” and “near zone” to eliminate the “near-field effect” and increase the exploration depth, MATLAB is used as the programming and calculation tool, the measured Cagniard apparent resistivity and the corresponding small amount of measurement parameters are directly utilized, and starting from the Cagniard apparent resistivity formula, an orthogonal iterative method is adopted to obtain the apparent resistivity of the whole area, and the calculation program code is given. The results show that the forward iterative calculation method is effective in obtaining the all-time apparent resistivity and realizing the “near-field effect” correction, and has high accuracy and speed, and the program code can be used directly as a tool for processing the CSAMT measured data.

Key words: CSAMT; MATLAB; all-time apparent resistivity; Cagniard resistivity

1 前言

可控源音频大地电磁法 (Controlled Source Audio-frequency Magnetotellurics Method, 简称 CSAMT), 是 20 世纪 70 年代初, 加拿大多伦多大学的 D. W. Strangway 教授和他的学生 M. A. Goldstein 提出沿用音频大地电磁法 (AMT) 的测量方式, 观测人工供电产生的音频电磁场, 称这种方法为 CSAMT^[1]。

CSAMT 法具有勘探深度范围大、分辨力较强、对低阻地层敏感、抗干扰能力强、施工效率高等优点, 已经广泛地将其独立运用, 或与其他物探手段联合运用于地下水^[2]、地热调查^[3]、隐伏矿产、煤矿^[4]、构造勘查等领域。但是, 对 CSAMT 法数据处理就是一大难点, 存在近场效应、静态效应等, 使得难以对数据反映的真实地质条件做出正确判断。

我国在电磁探测技术上, 随着 CSAMT 法的成熟和对其深入研究, 何继善在 CSAMT 法的基础上提出了广域电磁测深法^[5], 可以在过渡带进行测量, 扩大了测量范围, 即以较小的收发距探测到较大的深度; 最新发展的极低频电磁法 (简称 WEM 法), 又称“天波”探测^[6]; 多通道瞬变电磁法 (简称 MTEM) 和电性源短偏移瞬变电磁法 (简称 SOTEM) 等电磁探测新技术。然而, 这些新技术均未得到广泛运用, CSAMT 法仍然是较为成熟的、可以解决深部探测的技术手段。数据的处理方面, 其“近区”和“过渡区”数据很难直接使用, 会造成数据资料浪费。针对近场效应的校正和利用, 经过许多学者的大量研究, 对 CSAMT 数据进行“过渡区”“近区”数据校正后, 可获得与“远区”情况相同的视电阻率, 即全区视电阻率。对所有测量频率下获得的视电阻率数据主要有两种利用方式, 第一种是将全区视电阻率等同于 AMT (音频大地电磁法) 测量的结果, 就可以利用 MT (大地电磁法) 的解释方法对校正后的 CSAMT 资料进行定性解释^[7]; 第二种是人工源频率电磁测深的 3 个场区中, 只有“远区”和“过渡区” (中区) 才能实现频率测深^[8], 即通过变更测量频率进而改变探测深度, 对“近区”场不能做频率电磁测深, 等价于直流场, 频率的改变并不能改变探测深度, 只能通过变更偏移距实现几何测深^[1]。对于全区视电阻率, 能反映出过渡区的地电特征^[9], 也能在所有区域都能正确反映地电断面垂向变化规律^[10]。可见, 对校正后的全区视电阻率可以分段对待, 可以利用“远区”和“过渡区”数据增加测量深度; 由于近区数据等价于直流场的特点, 可利用近区数据反映底部电阻

率特征, 进而为其他层位电阻率分析提供参照。无论以何种方式使用全区视电阻率数据, 都具有实际意义。

基于 CSAMT 法全区数据的可利用性, 对“过渡区”“近区”数据进行校正已有不少校正方法, 主要有“过渡区三角形法^[11]”等以系数修正的方式; 直接利用全区视电阻率的概念, 即通过数值求解方法从场值或场值的比值中直接求解出全区视电阻率; 或者以不同定义方式计算全区视电阻率^[12]等。本文就利用 MATLAB 作为计算工具, 利用其成熟的数学运算能力和自带的运算函数库, 直接从全区视电阻率的概念出发, 经过卡尼亚视电阻率公式以及实测卡尼亚视电阻率和少数对应测量参数, 经过正演迭代求取全区视电阻率, 这一方法解决了电场、磁场分量中包含的贝塞尔函数等复杂函数, 以及迭代计算中存在超越函数难以直接求解等计算难题, 并且具有较高计算精度和计算速度, 可满足数据处理过程中对近场校正的需要, 为高效处理 CSAMT 法实测数据提供了计算方法, 也为类似复杂的数据处理提供了处理思路。

2 方法原理

2.1 CSAMT 法近场效应

CSAMT 在生产测量中常用的测量方式为标量测量模式, 当采用赤道 (旁侧) E_x/H_y 装置时, 在忽略位移电流的情况下^[13], 按卡尼亚 (Cagniard) 视电阻率公式计算每个频点上的视电阻率 ρ_w 和 φ_w 。在供电极 AB 中垂线两侧各 30° 张角且收发距 $r \geq 4\delta$ (δ 为趋肤深度) 的测量范围内, 具有信号强度大、生产效率高等优点。

在准静态极限条件下柱坐标系中, 供电电偶极子 AB 向下提供不同频率的谐变电流, 在电阻率为 ρ 的均匀半空间表面引起的互相垂直的电场、磁场分量表达式以及其中两种方式定义的视电阻率和阻抗相位^[10]:

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

$$H_y = -Idl[6I_1K_1 + ikr(I_1K_0 - I_0K_1)] \cdot \sin\varphi/(4\pi r^2) \quad (2)$$

$$H_z = Idl\rho\sin\varphi \cdot [3 - (3 - 3ikr - k^2r^2)e^{-ikr}]/(2\pi r^4\mu\omega) \quad (3)$$

$$\rho_w = \frac{1}{2\pi\mu\omega} \cdot \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2} = \frac{|E_x|^2}{5f|H_y|^2} \quad (4)$$

$$\varphi_w = \arctan\left[\frac{\text{Im}(E_x/H_y)}{\text{Re}(E_x/H_y)}\right] - \frac{\pi}{4} \quad (5)$$

$$\rho_j = 0.5 \cdot r \cdot \frac{|E_x|}{|H_y|} \quad (6)$$

式(1)~式(5)中, ρ_w 为卡尼亚视电阻率($\Omega \cdot m$); φ_w 为卡尼亚视电阻率相位($^\circ$); ρ_e 为全区视电阻率($\Omega \cdot m$); φ_e 为全区视电阻率相位($^\circ$); ρ_f 为近区公式计算的视电阻率($\Omega \cdot m$); E_x 为电场水平分量(mv/km), 方向和电偶极子 AB 方向相同; H_y 为磁场水平分量(nT), 方向垂直于电偶极子 AB 方向; H_z 为磁场垂直分量(nT), 方向垂直于地面向下; r 为收发距(m 或 km), 即接收点到电偶极子中心矢径的模; φ 为 r 与 AB 方向的夹角($^\circ$); I 为源电流强度(A); dl 为电偶极子 AB 长度(m 或 km); μ 为均匀半空间的磁导率(H/m), $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; ρ 是地层电阻率($\Omega \cdot m$); ω 代表谐变电流的圆频率(Hz), $\omega = 2\pi f$; k 为地球介质的电磁波传播波数, 在准静态极限下有 $k = \sqrt{-i\omega\mu/\rho}$; I_0 、 I_1 和 K_0 、 K_1 分别是第一类和第二类以 $ikr/2$ 为宗量的虚宗量贝塞尔函数, 0 和 1 代表阶数。

在实际生产中, 为了兼顾探测深度和信号强度的需要, 收发距 r 将选择在有限长度范围内, 趋肤深度 δ 还与大地电阻率 ρ 和工作频率 f 有关, 以趋肤深度 δ 表示为: $\delta = 503 \sqrt{\rho/f}$ 。

当 $r > 4\delta$ 时为远区场, 当 $\delta < r < 4\delta$ 时为过渡区场, 当 $r < \delta$ 时为近区场^[14], 当部分频率工作在近区和过渡区时, 由于人工源的存在, 产生了与人工源发射频率有关的非平面波效应, 使得卡尼亚电阻率发生严重畸变, 主要表现为在双对数坐标上卡尼亚电阻率曲线在过渡区形成低谷或凹陷, 在近区低频段呈 45° 上升^[15], 而不是趋于下伏岩层电阻率。 φ_w 曲线趋向于 0° ^[7], 此时的卡尼亚电阻率只是一种近似值, 该近似值远远大于实际电阻率值, 这种现象称为近场效应。为了充分发掘实测数据反映的地质信息, 增加反演深度, 对原始测量数据进行近场校正再做进一步解释是一有效方法。

2.2 全区视电阻率定义

全区视电阻率也称全频域视电阻率, CSAMT 的卡尼亚视电阻率是在均匀半空间下定义的电阻率, 当地下介质不再是均匀半空间时, 卡尼亚电阻率实际上是一种等效替代, 即将地下复杂介质的电阻率等效为某一均匀半空间的电阻率^[15], 它表征了对应频率所反映的空间上总体电性的加权平均效应^[16]。

把具有等效电阻率 ρ_s 的第(4)式卡尼亚视电阻率公式完整写出为如式(7)所示:

$$\rho_w = \frac{|E_x|^2}{5f |H_y|^2} = \frac{1}{i\omega} \frac{|Idl\rho_s [3\cos^2\varphi - 2 + (1 + ikr)e^{-ikr}]/(2\pi r^3)|^2}{|-Idl[6I_1K_1 + ikr(I_0K_1 - I_0K_1)] \cdot \sin\varphi/(4\pi r^2)|^2} \quad (7)$$

式(7)是具有等效电阻率 ρ_s 的半空间按照比值法定义的卡尼亚视电阻率公式, 其中波数 k 以及电场分量 E_x 、磁场分量 H_y 都是含有该等效电阻率 ρ_s 的表达式, 同时还与收发距 r 、方位角 φ 、频率 f 有关。

对于式(7)可以这样理解: 每一个实测的卡尼亚视电阻率 ρ_w 都有一个唯一的等效电阻率 ρ_s 与之对应, 该 ρ_s 的 E_x 、 H_y 响应按照第(4)式计算时, 得到具有“过渡区”和“近区”畸变的卡尼亚视电阻率 ρ_w ; 如何寻找满足式(7)的 ρ_s 值才是我们研究的重点, 直接从完整的第(7)式出发, 利用“等效电阻率全频域视电阻率法”, 采用数值求根法^[17]以正演迭代方式计算满足该卡尼亚视电阻率 ρ_w 的等效电阻率 ρ_s 。即在给定测量参数的情况下, 任意一个 ρ_s 值代入式(7)等号右边, 可求出一个新的卡尼亚视电阻率 ρ_w 值, 经过不断调整 ρ_s 值, 直到代入计算的 ρ_w 值与实测的 ρ_w 值误差在一个容许范围内时, 该 ρ_s 值为所要求的对应频率下全区视电阻率。

2.3 全区视电阻率计算

在电磁法勘探理论中, 贝塞尔函数运用一般运算方法很难求取, 因此, 借助 Matlab 强大的数学功能便可轻松计算, 贝塞尔函数 I_0 、 I_1 和 K_0 、 K_1 利用 Matlab 语言即可简单表达为 $I_0 = \text{besseli}(0, ikr/2)$, $I_1 = \text{besseli}(1, ikr/2)$, $K_0 = \text{besselk}(0, ikr/2)$, $K_1 = \text{besselk}(1, ikr/2)$, 与汉克尔滤波系数法计算相比较, 消除了因抽样引起的计算振荡, 使得计算过程简单, 程序小巧。

MATLAB 是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件, 如今已发展了多个版本, 运用涵盖各个需要有效数值计算的科学领域, 使其成为地球物理科学计算方面的首选解题工具^[19]。其通用数理类函数包含了各类贝塞尔函数、勒让德函数在内的基本数学函数和特殊函数, 具有强大绘图能力, 能够利用数据可视化有效辅助研究分析。其编程语言语法简洁明了、效率高, 还可以利用 Matlab 图形用户界面(GUI)设计编写应用程序。

在 Matlab 的 Editor 窗口中编制相应计算程序, 程序代码见附录 A, 主要利用前述式(1)~式(5)、式(7), 借用“二分法”的计算思路进行计算, 程序主要运算步骤如下:

(1) 读入相应测点的测量参数, 包括收发距 r 、夹角 φ 、频率 f 、实测卡尼亚视电阻率数据 ρ_w ; 设定计算相对误差阈值 eps。

(2) 读取一个频率 f 和对应测量值卡尼亚视电阻率 ρ_w , 以实测 ρ_w 为迭代初值 ρ_s , 并计算该频率下角频率 $\omega = 2\pi f$ 和波数 $k = \sqrt{-i\omega\mu/\rho_s}$, 用于迭代的

视电阻率区间 $(\rho_{\min}, \rho_{\max})$, 设 $\rho_{\min} = 1$, $\rho_{\max} = 1\ 000 \times \rho_w$ 。

(3) 对每个频率下设置最大循环迭代次数 $n = 2\ 000$, 每次循环均计算新的卡尼亚视电阻率 ρ_{w_new} , 并计算相对误差 $[2 \times (\rho_{w_new} - \rho_w) / (\rho_{w_new} + \rho_w)] \times 100\%$ 。

(4) 判断相对误差, 若相对误差的绝对值小于设定误差值, 则停止迭代, 此时的 ρ_s 值就为要求的全区电阻率值 ρ_e ; 否则, 更改视电阻率区间, 重新搜索 ρ_s , 令 $\rho_{mid} = 0.5 \times (\rho_{\min} + \rho_{\max})$, 重新返回第 (3) 步。直到寻找到该频率下符合误差要求的全区视电阻率值。

(5) 当某一个频率下计算结果达到精度要求时, 此时多为迭代的初值 ρ_s 就是要求的全区视电阻率 ρ_e , 返回第 (2) 步, 计算下一个频率, 直到完成所有频点的计算, 结束该点近场校正计算。若达到最大迭代次数未能满足精度要求或计算不收敛, 则查找原因。

利用 Matlab 进行的正演迭代运算需要准备计算公式中各个变量, 卡尼亚视电阻率 ρ_w 、频率 f 、收发距 r 和夹角 φ 应该对应同一测点, 可以从测量数据获取或对应的观测系统中测量而得, 以减小计算误差。

2.4 模型计算验证

为了验证该迭代方法的有效性, 利用式 (1)~式 (5), 进行正演模拟, 取 $r = 6\ 000\ \text{m}$ 、 $\varphi = 90^\circ$ 、 $Idl = 1$ 、 $\rho = 200\ \Omega \cdot \text{m}$ 的均匀半空间, 选择频率范围为 $0.125\ \text{Hz} \sim 9\ 600\ \text{Hz}$ 之间, 设置误差小于 3% , 进行电场分量、磁场分量正演计算, 并求出理论卡尼亚视电阻率及阻抗相位。以正演参数为基础, 利用附录 A 的程序迭代求取全区视电阻率值, 得到均匀半空间模型 CSAMT 理论曲线与迭代计算全区视电阻率对比结果 (图 1)。

图 1 中 (a) 为均匀半空间模型的 CSAMT 法正演卡尼亚视电阻率和迭代计算求取的全区视电阻率, 为了便于对比, 同时绘制了以近区公式计算的视电阻率曲线; 图 1 (b) 为卡尼亚视电阻率相位和全区视电阻率阻抗相位曲线图。从图 1 (a) 中看出, 在频率大于 $30\ \text{Hz}$ 的频率段, 卡尼亚视电阻率就等于全区电阻率; 在低频段 $13\ \text{Hz}$ 附近出现“极小值”, 并随后呈现 45° 上升趋势, 严重偏离真电阻率, 远区视电阻率、近区视电阻率和全区视电阻率构成了明显“三角形”区域, 说明该区域为过渡区; 在近区, 全区视电阻率收敛于水平渐近线, 并等于均匀半空间真电阻率, 也收敛于近区公式计算视电阻率; 同时, 在

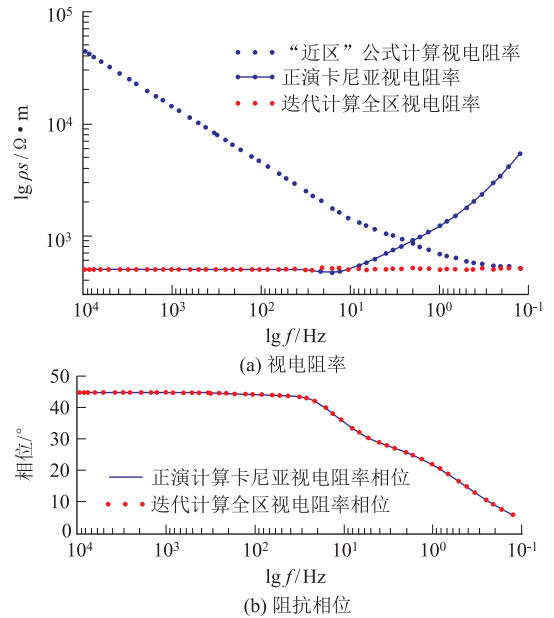


图 1 均匀半空间 CSAMT 法正演模拟

频率小于 $30\ \text{Hz}$ 的频率段, 阻抗相位不再呈 45° , 而是出现下降的畸变, 也反映了该频率段不再属于“远区”。经过迭代计算, 得到了大地的全区视电阻率, 并且整体上已被校正为一条直线, 该全区视电阻率很好地吻合了真电阻率, 说明全区视电阻率消除了过渡区及近区的畸变, 在相位上 (图 1 (b)), 全区视电阻率阻抗相位与真电阻率情况下电磁场分量相位差, 基本相等, 同时也证明了以迭代结果为全区视电阻率是正确的。没有出现振荡现象, 说明所用正演公式、各分量计算是正确的, 迭代计算全区视电阻率方法是可行的。

2.5 计算实例

本次用于计算验证的数据引用安徽某地地热勘查项目的实测数据和相应观测参数。该 CSAMT 数据由加拿大凤凰地球物理有限公司的 V8 多功能电法仪采集的。选择其中一个测量点为 3 750/L4, 提取相应观测参数有 f (f 范围 $7\ 680 \sim 0.125\ \text{Hz}$, 共计 49 个频率点), 卡尼亚视电阻率 ρ_w , 电场分量 E_x , 磁场分量 H_y , 该点对应收发距 $r = 13\ 107\ \text{m}$, 夹角 $\varphi = 89.543^\circ$, 设置迭代计算相对误差 1% 。单测点迭代计算全区视电阻率结果见图 2。

图 2 为以实地测量的卡尼亚视电阻率和迭代计算求取的全区视电阻率曲线, 同时绘制了近区公式计算的视电阻率曲线。从不同方式定义的视电阻率曲线可以看出, 在整个测量频率段内, 迭代求取的全区视电阻率分别与“远区”“近区”公式计算的视电阻率拟合较好, 在近区收敛于一个稳定值; 在过渡区, 通过卡尼亚视电阻率、近区公式计算视电阻率和全

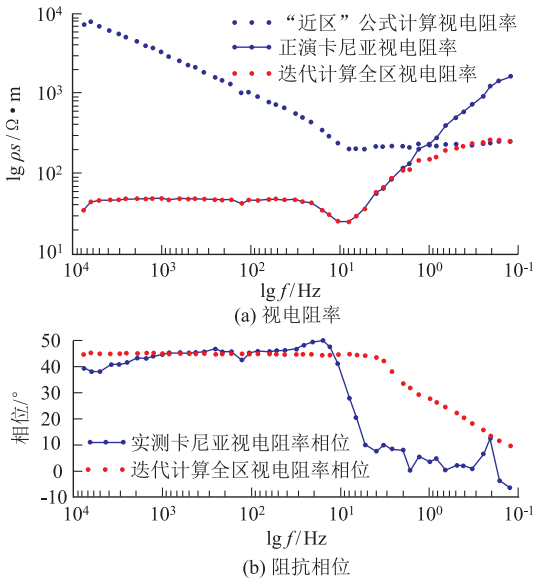


图2 3 750/L4 测量点实测数据和全区视电阻率曲线

区视电阻率形成明显“三角形”区域,全区视电阻率明显减小了过渡区畸变。在“三角形”对应频段及更低频率段,全区视电阻率相位出现畸变,可见经过近场校正,可利用的远区数据个数有所增加。另外,通过“三角形”区域可直观反映“远区”“过渡区”“近区”的频率范围。说明在相应测量参数的约束下,对应该测区条件,达到了过渡区和近区校正的目的。

通过分析迭代计算的运算过程发现,在高频段迭代次数为 1 次,也证实了远区视电阻率就等于全区视电阻率,在低频段经过有限次迭代计算,均达到预期效果,整个过程共产生 193 次迭代计算。可见,该迭代计算方法实现 CSAMT 法近场校正快速有效的,程序运行是稳健的。

用相似的迭代计算思想,还可以利用电场分量迭代求取以电场分量定义的全区视电阻率等。

3 结论

通过对 CSAMT 法近场效应的充分认识,认为对该勘探方法过渡区和近区数据进行校正并加以进一步利用是有意义的。并且利用 Matlab 的强大的运算能力,直接从 CSAMT 法卡尼亚视电阻率的定义上入手,在均匀半空间模型进行正演计算并迭代求取全区视电阻率的基础上,利用实地生产测量数据,结合相应观测参数,进行充分计算利用,实现了实测数据求取全区视电阻率,达到近场校正的目的。并获得以下结论:

(1) 把 Matlab 利用到地球物理勘探的计算中,尤其是对含有特殊函数、超越函数的电磁法理论数

据的计算,可充分利用其在带函数库,通过极简洁的代码编写,即可快速实现大量的、复杂的数学运算。对本文中提供的代码可以进一步改进,以适应多个测点一次性自动计算完成,提高效率。

(2) 利用卡尼亚视电阻率公式迭代计算全区视电阻率,只需要相应测点对应的观测参数或采集数据,包括频率 f 、卡尼亚视电阻率 ρ (或对应电场分量、磁场分量)、收发距 r 、 r 与电偶极子 AB 方向的夹角 φ ,无需引入其他变量,经过直接迭代计算便可实现近场校正,避免了用信号发射端的发送电流强度和电偶极子长度等参数参与的计算,计算过程更容易实现,提高了计算精度。为进一步充分处理和分析 CSAMT 法测量数据打下了基础,也为类似具有复杂运算的地球物理数据处理提供了方法参考。

附录 A 正演迭代计算程序和说明

```
f=[7 680,6 400,5 120,3 840,3 070,2 560,1 920,
1 540,1 280,1 020,853,640,512,427,341,256,
213,171,128,107,85.3,64,53.3,42.7,32,26.7,
21.3,16,13.3,10.7,8,6.67,5.33,4,3.33,2.67,2,
1.67,1.33,1,0.833,0.667,0.5,0.417,0.333,
0.25,0.208,0.167,0.125];% f:频率 f
pw=[34.35,43.93,46.08,46.6,46.79,48.09,48.16,
48.24,48.6,48.87,47.2,48.42,48.1,47.92,47.68,47.37,
47.09,46.74,42.27,46.51,45.76,47.3,47.91,46.69,
47.4,44.77,43.37,34.79,30.26,25.16,24.98,29.11,
36.35,57.71,64.53,84.73,116.6,131.1,200.6,234.1,
277.9,393.8,498.6,587.5,725,923,1219.1,1426.8,
1642.2];% pw:实测卡尼亚视电阻率  $\rho_w$ 
phiw=[39.4,38.2,38.1,40.7,40.7,41.6,43.3,43.2,
44.1,44.8,45.3,45.3,45.5,45.7,47,45.6,46,42.5,
45.4,46.2,45.8,46.1,46.1,46.9,48.1,49.5,50.3,47.6,
41.3,28,20.5,9.98,7.47,9.96,8.07,7.9,-0.172,5.36,
3.36,4.65,0.157,2.15,1.95,0.615,6.46,12.6,-3.77,
-6.64];% phiw:实测卡尼亚视电阻率相位  $\varphi_w$ 
ps_near=[7 248.7,7 754.9,7 114.9,6 184.3,5 552.5,
5 142.6,4 457.1,3 987.3,3 657.1,3 276.8,2 940.8,2 579,
2 300,2 095,1 869.2,1 613.1,1 468.2,1 309.4,1 042.6,
1 031.3,911.7,793.6,740.2,654.1,570.5,506.3,445.4,
345.6,294.2,240.1,207.1,204.1,204.1,222.5,214.9,
219.8,223,215.6,239.7,224,220.9,235.5,228.3,219,
231,240.2,244.8,253,252.8];% ps_near:实测  $E_x$  分量和  $H_y$  分量以近区公式计算的视电阻率
miu=4 * pi * 10^(-7); phi=89.543; PE=1; r=13 107;
eps=0.01;
%参数说明:miu 对应参数  $\mu$ ,phi 对应参数  $\varphi$ ,单位:°;PE=
I * dl; r 对应参数  $r$ ,单位:m;eps 为设定相对误差,为 1%。
```

```

for n=1:length(f) %按频率 f 循环
    pmin=2; pmax=10 000 * pw(n); w=2 * pi * f(n); %设置
    迭代计算数值查询区间; w 对应参数 ω;
    for t=1:2 000 %最大循环迭代次数 2 000
        if t==1
            pmid=pw(n);
        end
        k=sqrt(-1i * w * miu/pmid); %波数 k
        I0=besseli(0,1i * k * r/2); I1=besseli(1,1i * k * r/
        2); K0=besselk(0,1i * k * r/2); K1=besselk(1,1i *
        k * r/2); % I0、K0、I1、K1 对应参数 I0、K0、I1、K1
        Ex=pmid * PE * (3 * cosd(phi)^2-2+(1+1i * k *
        r) * exp(-1i * k * r))/(2 * pi * r^3);
        Hy=-PE * sind(phi) * (6 * I1 * K1 + 1i * k * r *
        (I1 * K0 - I0 * K1))/(4 * pi * r^2);
        pwnew(n)=(1/(w * miu)) * abs(Ex/Hy) * abs
        (Ex/Hy); %迭代计算的卡尼亚视电阻率
        wucha=(pwnew(n)-pw(n))/(0.5 * (pw(n)+pw
        _new(n)));
        if abs(wucha)<=eps || t==2 000;
            pe(n)=pmid; %迭代计算全区视电阻率 ρe
            phie(n)=rad2deg(angle((Ex)/(Hy))); %全
            区视电阻率相位 φe
        break;
    else
        if wucha>0;
            pmax=pmid; pmid=0.5 * (pmin+pmax);
        else
            pmin=pmid; pmid=0.5 * (pmin+pmax);
        end
    end
end
end
end
% 计算结束后, pe, phie 分别为所要求的全区视电阻率
ρe 和阻抗相位 φe。

```

参考文献

- [1] 钟幼生, 韩自强, 罗姣, 等. 关于可控源音频大地电磁法探测深度的探讨[J]. 物探与化探, 2015, 39(4): 768-774.
- [2] 底青云, 石昆法, 王妙月, 等. CSAMT 法和高密度电法探测地下水资源[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(3): 53-57.
- [3] 张作宏, 王军成, 戴康明. CSAMT 在沿海围垦区地热勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 680-683.
- [4] 成江明. 可控源音频大地电磁法在隐伏煤矿区的应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4): 1269-1272.
- [5] 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): 1065-1072.
- [6] 底青云, 朱日祥, 薛国强, 等. 我国深地资源电磁探测新技术研究进展[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2128-2138.
- [7] 周茂军, 周玉冰. 可控源音频大地电磁法(CSAMT)的近场效应和近场校正[J]. 辽宁地质, 1993, (3): 272-281.
- [8] 陈明生. 关于频率电磁测深几个问题的探讨(五)——频率电磁测深中电磁场波形及意义[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(1): 64-67.
- [9] 陈明生. 关于频率电磁测深几个问题的探讨(二)——频率电磁测深探测深度的几个问题分析[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(6): 67-70.
- [10] 汤井田, 何继善. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 中南大学出版社, 2005: 33-111.
- [11] 邝广. 可控源音频大地电磁法的场区校正[J]. 中国煤炭地质, 1996, 8(3): 74-77.
- [12] 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(03): 253-256.
- [13] 林威. CSAMT 法过渡区电磁场的特征[J]. 物探与化探, 2009, 33(2): 148-150.
- [14] 中华人民共和国国土资源部. 可控源音频大地电磁法技术规程(DZ/T0280-2015)[S]. 北京: 地质出版社, 2015: 25-28.
- [15] 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.
- [16] 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(04): 543-552.
- [17] 严良俊, 谢兴兵, 史维. CSAMT 近场校正方法研究与应用[C]. 中国国际地球电磁学讨论会, 2007: 208-211.

作者简介: 李能勇(1987—), 男, 四川省宁南县人, 2012年毕业于成都理工大学, 本科, 工程师, 主要从事地球物理勘探与研究。E-mail: 1060428620@qq.com