

doi: 10.11720/wtyht.2022.1382

钟华,唐新功. CSAMT 一维正演可视化设计与激发极化效应[J]. 物探与化探, 2022, 46(2): 459-466. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1382>  
Zhong H, Tang X G. Visualization design of 1D CSAMT forward modeling and research on the induced polarization effect[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(2): 459-466. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1382>

# CSAMT 一维正演可视化设计与激发极化效应

钟华<sup>1,2</sup>, 唐新功<sup>1,2</sup>

(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 非常规油气湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430100)

**摘要:** 针对可控源音频大地电磁法(CSAMT)开发了一套 CSAMT 一维数据正演可视化软件。其界面友好,操作简单;使用 MATLAB 进行核心算法的编写,正演计算过程引入线性滤波系数对汉克尔积分进行求解,并对不同线性滤波系数方案的精度进行了比较;基于 Java 语言进行操作界面设计,提供多参数设置界面,自动化程度高;通过软件自带的绘图功能,将数据处理结果直观地提供给用户。在计算过程中引入 Cole-Cole 模型参数,以复电阻率代替不考虑地体极化效应的直流电阻率,对 CSAMT 场源一维层状激化介质模型进行了正演模拟,讨论了极化层分别位于不同深度时一维层状介质的极化效应。研究发现极化层埋藏越浅,极化效应对于 CSAMT 的影响频带越宽。这对于认识含极化效应的 CSAMT 方法的电磁响应特征,提高数据处理便利度与工作效率方面都具有重要的作用。

**关键词:** 一维正演;汉克尔变换;可视化;激发极化;Java

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2022)02-0459-08

## 0 引言

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是一种频率域电磁测深方法<sup>[1]</sup>,它使用接地导线或不接地回线为人工信号源<sup>[2]</sup>,并通过变换频率来产生不同的电磁波信号。CSAMT 采用人工源,比起天然源有更高的信噪比<sup>[1]</sup>,近年来,在油气资源、固体矿物资源、地热、工程地球物理等领域已成为主流的勘探手段之一。

目前,国内外学者已针对可控源音频大地电磁法开展过一系列研究,并开发出了一维、二维和三维的正反演程序,其中既有各向同性的,也有各向异性的,但是都是以高级语言直接编程实现的,具有可视化界面的不多。考虑到修改模型时,在程序中来回改变参数的方式不仅繁琐还容易出错,本文针对 MATLAB 编写的模拟程序,通过将其打包成 Jar 包,封装在 Java 语言编写的应用程序中,实现了在

图形界面中直接进行输入输出、数值计算以及基本绘图等功能<sup>[3]</sup>。这里以 CSAMT 一维正演程序为例,阐述了程序功能的实现思路及使用 Java 语言进行界面封装以实现程序可视化的方案,最后详细讨论了激发极化效应对一维模型的影响。

## 1 方法原理

### 1.1 水平层状介质电偶极子源

电偶极子源是在有限长的接地导线中供入谐波电流,通过改变供电电流的频率,在地下建立相应频率的电磁场。水平层状介质上的电偶极子激发的地电模型如图 1 所示,其中  $N$  层水平层状介质中第  $n$  层的电阻率和层厚度分别记为  $\rho_n$  和  $h_n$ <sup>[4]</sup>。取电偶极子中心为坐标原点,  $x$  轴指向偶极矩方向,  $z$  轴垂直向下。利用柱坐标和直角坐标系之间的转换关系,得到准静态条件下直角坐标系中地表电磁场各分量的表达式<sup>[1,4]</sup>:

收稿日期: 2021-07-12; 修回日期: 2021-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41874119,41674107)资助

第一作者: 钟华(1996-),女,汉族,硕士研究生。研究方向:电磁法勘探与计算机。Email:3332706538@qq.com

通讯作者: 唐新功(1968-),男,汉族,博士,教授。研究方向:电磁法勘探、重力勘探、岩石物理与地球动力学。Email:tangxg@yangtzeu.edu.cn

$$E_x = \frac{IdL(i\omega\mu)}{2\pi} \int_0^\infty \left[ \frac{m}{m + m_1/R^*} + \left( \frac{mm_1}{k_1^2 R} - \frac{m}{m + m_1/R^*} \right) \cdot \cos^2 \varphi \right] \cdot J_0(mr) dm +$$

$$\frac{IdL(i\omega\mu)}{2\pi r} \cdot \int_0^\infty \frac{1}{m + m_1/R^*} - \frac{m_1}{k_1^2 R} \cos 2\varphi J_1(mr) dm ,$$

$$H_y = \frac{IdL}{2\pi} \int_0^\infty \left( \frac{m_1}{R^*} \cdot \frac{m}{m + m_1/R^*} \cdot \cos^2 \varphi - \frac{m_1}{R^*} \cdot \frac{m}{m + m_1/R^*} \right) \cdot J_0(mr) dm +$$

$$\frac{IdL}{2\pi r} \int_0^\infty \left( \frac{m}{m + m_1/R^*} \right) \cos 2\varphi \cdot J_1(mr) dm ;$$

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

$$R = \coth \left[ m_1 h_1 + \coth^{-1} \frac{m_1 \rho_1}{m_2 \rho_2} \coth \left( m_2 h_2 + \dots + \coth^{-1} \frac{m_{n-1} \rho_{n-1}}{m_n \rho_n} \right) \right] .$$

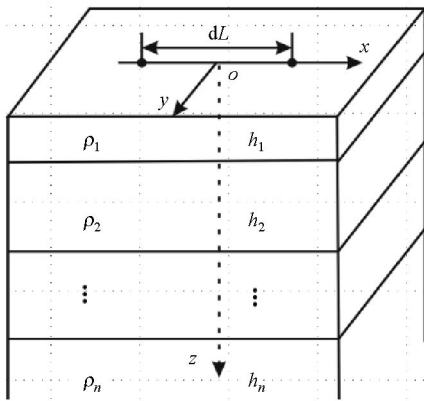


图1 水平层状介质上的电偶极子地电模型示意

Fig.1 Schematic diagram of electric dipole horizontal layered medium model

使用卡尼亚视电阻率计算公式可求得不同频率范围的视电阻率值<sup>[4]</sup>：

$$\rho_\omega = \frac{1}{\omega\mu} | E_x/H_y |^2 .$$

式中： $R$  和  $R^*$  是联系各层电性参数的函数； $IdL$  为偶极矩； $\varphi$  为偶极矩方向与偶极中心到测点连线之间的夹角； $r$  为收发距； $\omega$  为角频率； $\mu$  为空气中的磁导率， $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m； $m$  的物理意义是空间频率，具有距离倒数的量纲， $m_i = \sqrt{m^2 + k_i^2}$ ， $k_i^2 = -i\omega\mu/\rho_i$ ， $k_i$  为第  $i$  个电性层的波数， $\rho_i$  为第  $i$  层的电阻率； $J_0(mr)$  和  $J_1(mr)$  分别为以  $mr$  为变量的零阶贝塞尔函数和一阶贝塞尔函数。

### 1.2 Cole-Cole 模型的引入

在传统的可控源电磁法研究模拟中，通常认为大地电阻率是一个与频率无关的实数，实际上，由于电化学性质等因素的存在，大地各种岩（矿）石在受到激发源激发时会产生激发极化效应<sup>[5]</sup>，使得测量结果与真实值产生一定的偏差<sup>[6]</sup>。

对于前人已提出的十余种岩矿石激电响应模

型，选取应用最广泛的 Cole-Cole 模型，以复电阻率代替直流零频电阻率，对 CSAMT 场源一维层状模型进行正演模拟<sup>[7-9]</sup>，考察其视电阻率曲线的变化情况。表达式如下：

$$\rho(i\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\} ,$$

式中： $\rho_0$  为零频电阻率， $m$  为极限极化率， $\tau$  为时间常数， $c$  表征复电阻率随频率变化程度的相关系数。

## 2 GUI 设计

将 CSAMT 一维层状模型进行正演所需的数据，通过图形用户界面 (graphics user interface, GUI) 进行文件导入或手动输入 (图 2)，这样在修改模型时就不需要在 MATLAB 代码中来回多次改变参数，既方便了数据的输入，又降低了出错的概率。

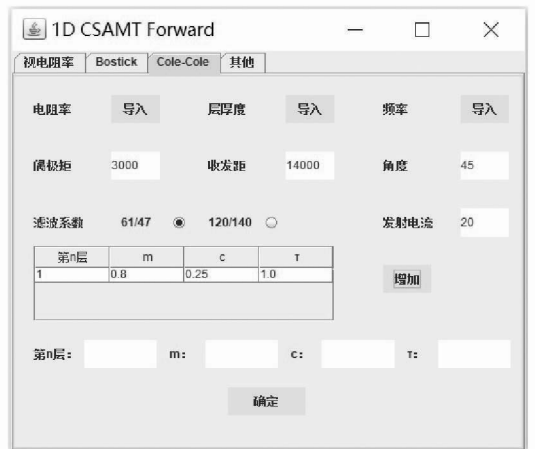


图2 参数输入界面

Fig.2 Parameter input interface

如图 2 所示，选择 JLabel 标签组件显示绘制视电阻率曲线所需参数的名称，以提示用户该输入什

么类型的数据;使用 JTextField 文本框组件来接收单个变量,如发射电流、偶极矩等;给 JButton 按钮组件增加 MouseEvent 监听事件,当用鼠标点击“导入”,唤起 JFileChooser 文件选择框,如图 3 所示。随后就可以选择导入对应的的数据文件,如电阻率、层厚度等。

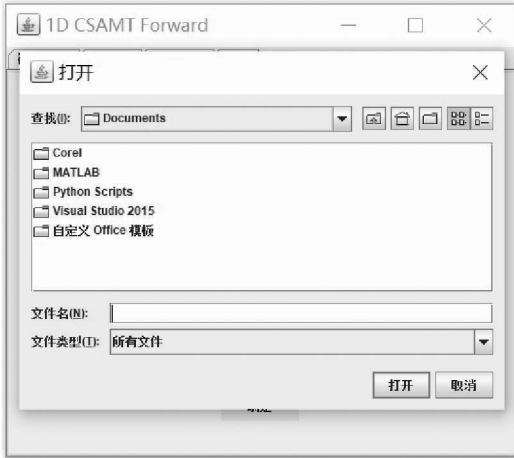


图 3 导入文件选择界面

Fig. 3 Import file selection interface

当鼠标点击“确定”按钮时,程序先检查输入的参数是否完整,如果不完整,就会提示出错,要求修改输入的参数文件,如图 4 所示。

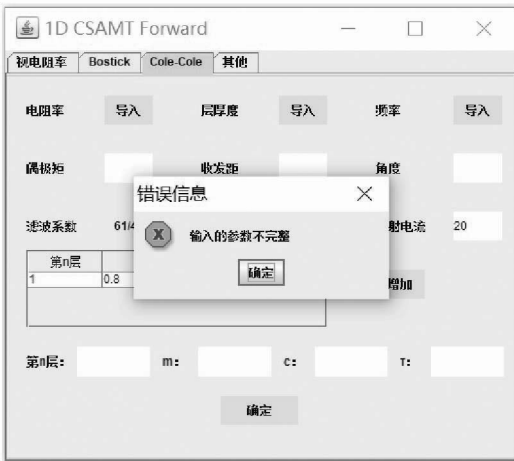


图 4 错误信息提示界面

Fig. 4 Error message prompt interface

若输入正确,便会通过传参的方式将输入的数据传递给 MATLAB 核心代码,并完成计算与绘图功能<sup>[10]</sup>,如图 5 所示。

### 3 正演试算

前人研究表明,时间常数和频率相关指数对激电效应的影响很小<sup>[9]</sup>,因此这里主要讨论使用充电

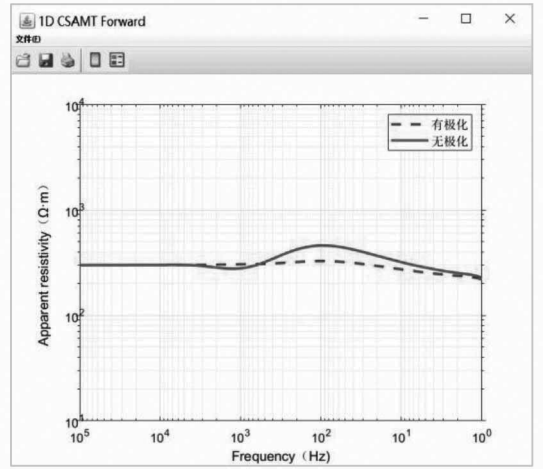


图 5 绘图界面

Fig. 5 Graphic interface

率参数来模拟极化层。设置时间指数  $\tau = 1.0$ , 频率相关指数  $c = 0.25$ , 极化率  $m = 0.8$ ; 研究极化层位于浅层、中间层以及深层时,分别考虑激发极化效应前、后的正演结果<sup>[11]</sup>。

#### 3.1 模型一:K 型断面

含激电效应的三层地层 K 型断面,收发距为 14 km, 频率范围  $f = 10^0 \sim 10^5$  Hz, 各地层电阻率与层厚度取值如表 1 所示。

表 1 K 型地电模型参数设置

Table 1 Parameter setting of K geoelectric model

| K 型结构 | 电阻率/( $\Omega \cdot m$ ) | 层厚度/m    |
|-------|--------------------------|----------|
| 第一层   | 300                      | 300      |
| 第二层   | 1000                     | 600      |
| 第三层   | 200                      | $\infty$ |

##### 3.1.1 极化层位于浅层

由图 6 可以看出,当极化层位于浅层时,视电阻率曲线在有无极化层时具有显著的不同。存在浅层极化层时,视电阻率值在全频段均小于无极化时的情形,无极化时视电阻率的极大值出现在频率  $f = 100$  Hz 附近,而存在极化时视电阻率极值则向低频偏移,出现在  $f = 10$  Hz 附近。

##### 3.1.2 极化层位于中间层

由图 7 可以看出,当极化层位于中间层时,视电阻率曲线对于有无极化层时的差异比极化层位于浅层时明显减小,极化层的影响主要体现在  $f = 10^0 \sim 10^3$  Hz 的范围,并且在 1 000 Hz 附近出现了存在极化的视电阻率值略高于无极化时的情形,而在其他频率范围内,与无极化时的视电阻率正演结果接近。

##### 3.1.3 极化层位于深层

图 8 是极化层位于深层时的视电阻结果,由图可见,当极化层位于深层时,极化效应主要影响低频

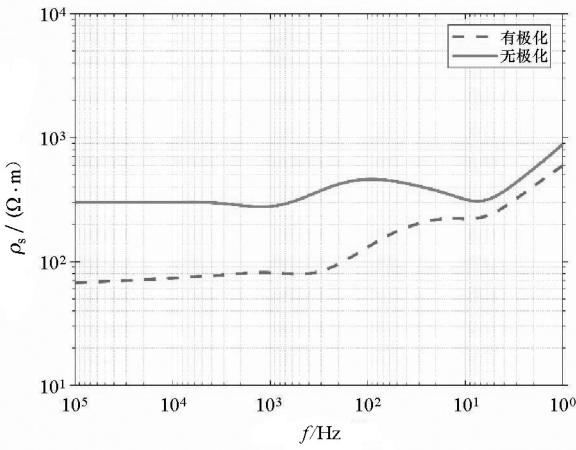


图 6 K 型地电模型极化层位于浅层时的视电阻率  
Fig. 6 Apparent resistivity of the K-type geoelectric model when the polarization layer is located in the shallow layer

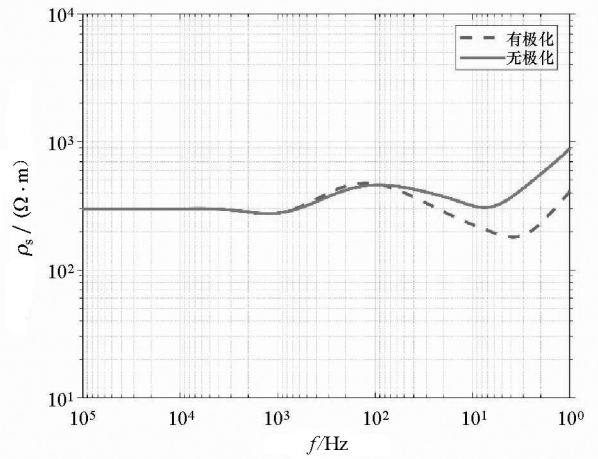


图 8 K 型地电模型极化层位于深层时的视电阻率  
Fig. 8 Apparent resistivity of the K-type geoelectric model when the polarization layer is located in the deep layer

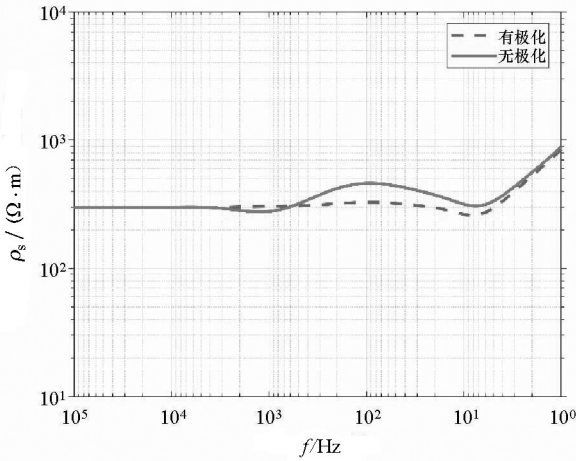


图 7 K 型地电模型极化层位于中间层时的视电阻率  
Fig. 7 Apparent resistivity of the K-type geoelectric model when the polarization layer is located in the middle layer

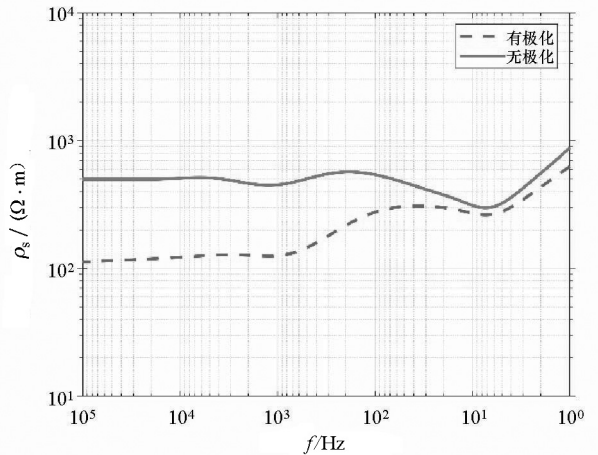


图 9 HK 型地电模型极化层位于第一层时的视电阻率  
Fig. 9 Apparent resistivity of HK-type geoelectric model when the polarization layer is located in the first layer

的数值,而当  $f > 100$  Hz 时,激发极化效应对模型正演结果的影响可以忽略。

### 3.2 模型二:HK 型断面

含激电效应的四层地层 HK 型断面,收发距与频率范围均与模型一相同,各地层电阻率与层厚度取值如表 2 所示。

表 2 HK 型地电模型参数设置

Table 2 Parameter setting of HK geoelectric model

| K 型结构 | 电阻率/( $\Omega \cdot m$ ) | 层厚度/m    |
|-------|--------------------------|----------|
| 第一层   | 500                      | 200      |
| 第二层   | 300                      | 100      |
| 第三层   | 1000                     | 500      |
| 第四层   | 200                      | $\infty$ |

#### 3.2.1 极化层位于浅层

由图 9 可以看出, HK 型断面的视电阻率曲线

对于浅层有无极化层存在的变化情况与 K 型大致相同,视电阻率值也是在全频段均小于无极化时的情形,并且存在极化的视电阻率极值向低频偏移。

#### 3.2.2 极化层位于中间层

图 10、图 11 分别是极化层位于第二层、第三层时的视电阻率曲线。可以看出:视电阻率曲线对于有无极化层时的差异也与 K 型断面相似,极化层的影响相对浅层减小,激电效应对模型的影响主要集中在中间频段;当极化层位于第三层时,视电阻率曲线对于有无极化层时的差异比极化层位于第二层时明显减小,且影响的异常频带也相对变小。除此之外,第二层存在极化的视电阻率值高于无极化时的情形仅在  $1800 \text{ Hz} < f < 10000 \text{ Hz}$  范围内出现,第三层仅在  $900 \text{ Hz} < f < 4000 \text{ Hz}$  范围内出现,并且差异也相

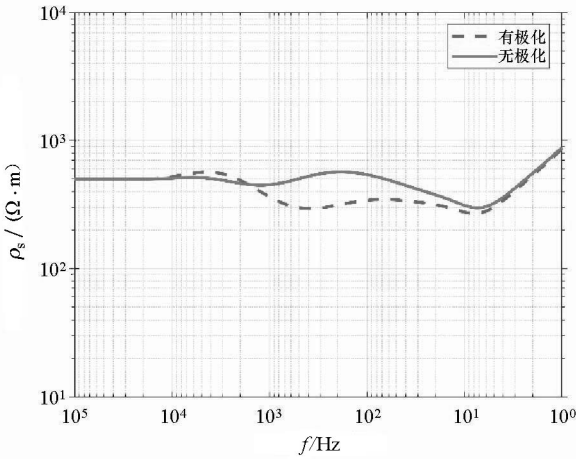


图 10 HK 型地电模型极化层位于第二层时的视电阻率  
Fig. 10 Apparent resistivity of HK-type geoelectric model when the polarization layer is located in the second layer

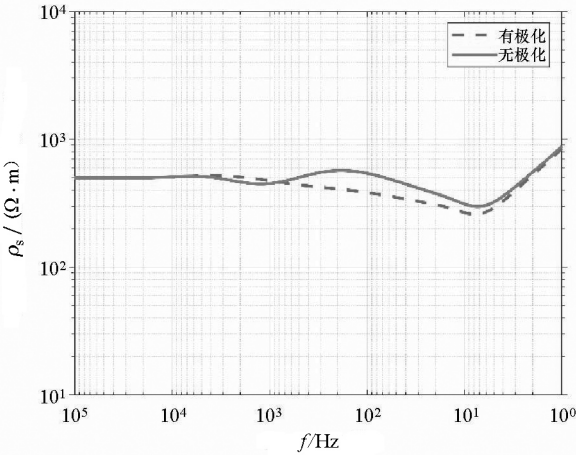


图 11 HK 型地电模型极化层位于第三层时的视电阻率  
Fig. 11 Apparent resistivity of HK-type geoelectric model when the polarization layer is located in the third layer

对减小。

### 3.2.3 极化层位于深层

图 12 为极化层位于最深层时的视电阻率结果。可以看出,当极化层位于最深层时,存在极化时的视电阻率值要低于无极化的情形,其差异与 K 型断面相似,极化效应的影响频带也主要出现在  $f < 100$  Hz 的低频范围内<sup>[11]</sup>。

## 3.3 模型三:QQ 型断面

含激电效应的四层地层 QQ 型断面,收发距与频率范围均与模型一相同,各地层电阻率与层厚度取值如表 3 所示。

### 3.3.1 极化层位于浅层

由图 13 可以看出,QQ 型断面的视电阻率曲线对于浅层有无极化层存在的变化情况与前面讨论结

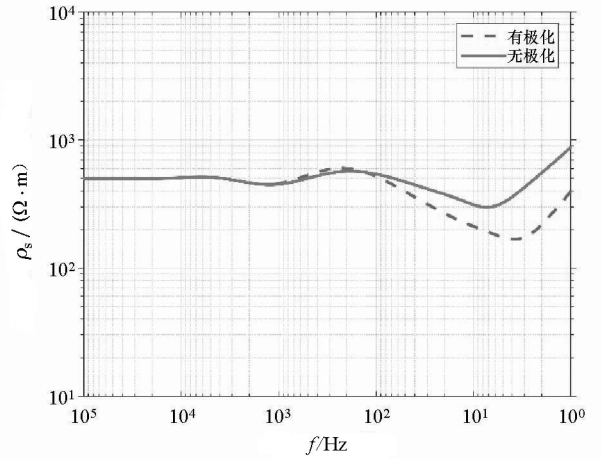


图 12 HK 型地电模型极化层位于第四层时的视电阻率  
Fig. 12 Apparent resistivity of HK-type geoelectric model when the polarization layer is located in the fourth layer

表 3 QQ 型地电模型参数设置

Table 3 Parameter setting of QQ geoelectric model

| QQ 型结构 | 电阻率/(Ω · m) | 层厚度/m |
|--------|-------------|-------|
| 第一层    | 1000        | 500   |
| 第二层    | 300         | 500   |
| 第三层    | 100         | 500   |
| 第四层    | 50          | ∞     |

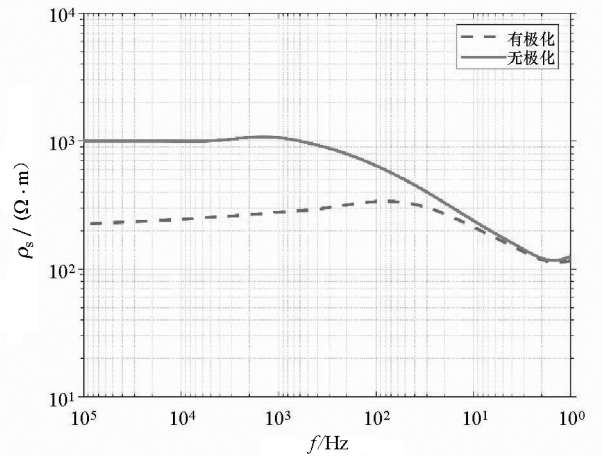


图 13 QQ 型地电模型极化层位于第一层时的视电阻率  
Fig. 13 Apparent resistivity of QQ-type geoelectric model when the polarization layer is located in the first layer

果一致,视电阻率值也是在全频段均小于无极化时的情形,且无极化时视电阻率的极大值出现在频率  $f = 1000$  Hz 附近,而存在无极化时视电阻率的极大值向低频偏移,出现在  $f = 80$  Hz 附近。

### 3.3.2 极化层位于中间层

从图 14 和图 15 可以看出,前面出现的规律也同样适用于 QQ 型断面。当极化层位于第二层时,

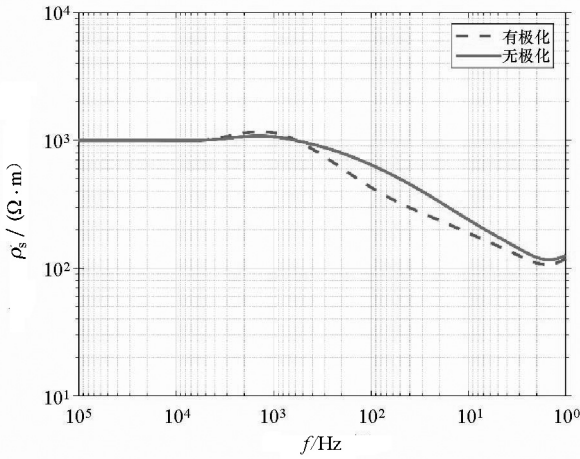


图 14 QQ 型地电模型极化层位于第二层时的视电阻率  
Fig. 14 Apparent resistivity of QQ-type geoelectric model when the polarization layer is located in the second layer

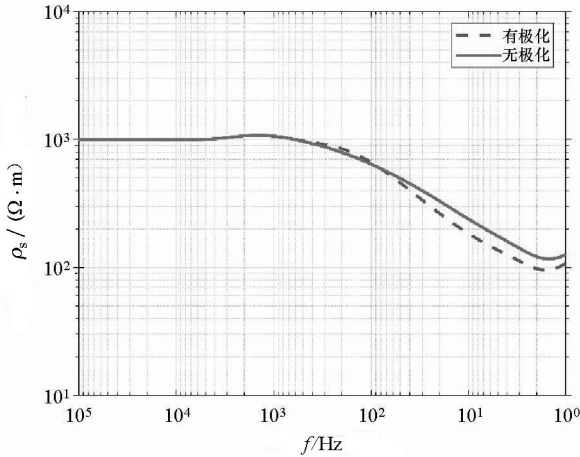


图 15 QQ 型地电模型极化层位于第三层时的视电阻率  
Fig. 15 Apparent resistivity of QQ-type geoelectric model when the polarization layer is located in the third layer

视电阻率曲线对于有无极化层时的差异比极化层位于第三层时大,且影响的异常频带也相对变大。除此之外,第三层存在极化的视电阻率值高于无极化时的频带小于在第二层时的情形,呈现向低频偏移的趋势。

### 3.3.3 极化层位于深层

由图 16 可以看出,当极化层位于 QQ 型断面最深层时,视电阻率曲线对于有无极化层时的差异也与前面的模型相似,极化效应的影响频带主要出现在  $f < 10 \text{ Hz}$  的低频范围内<sup>[11]</sup>,而在其他频率范围内,与无极化时的视电阻率正演结果接近。

## 3.4 模型四:HAK 型断面

含激电效应的五层地层 HAK 型断面,收发距与频率范围均与模型一相同,各地层电阻率与层厚度

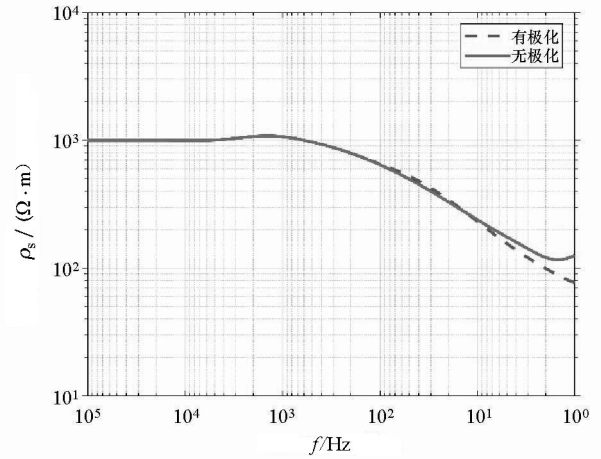


图 16 QQ 型地电模型极化层位于第四层时的视电阻率  
Fig. 16 Apparent resistivity of QQ-type geoelectric model when the polarization layer is located in the fourth layer

取值如表 4 所示。

表 4 HAK 型地电模型参数设置

Table 4 Parameter setting of HAK geoelectric model

| HAK 型结构 | 电阻率/( $\Omega \cdot \text{m}$ ) | 层厚度/m    |
|---------|---------------------------------|----------|
| 第一层     | 500                             | 500      |
| 第二层     | 50                              | 100      |
| 第三层     | 200                             | 800      |
| 第四层     | 1000                            | 1000     |
| 第五层     | 100                             | $\infty$ |

### 3.4.1 极化层位于浅层

由图 17 可以看出,当极化层位于浅层时,HAK 型断面的存在极化时的视电阻率曲线也是在全频段均小于无极化时的情形,且存在极化时视电阻率极值向低频偏移。

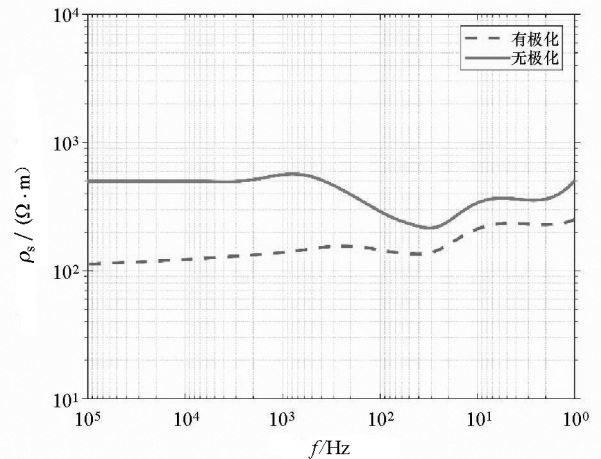


图 17 HAK 型地电模型极化层位于第一层时的视电阻率  
Fig. 17 Apparent resistivity of HAK-type geoelectric model when the polarization layer is located in the first layer

### 3.4.2 极化层位于中间层

图 18 和图 19 分别是极化层位于第二层、第三层时的视电阻率曲线,可以看出极化层的影响相对于浅层减小,机电效应对模型的影响主要集中在  $10^0 \text{ Hz} < f < 10^3 \text{ Hz}$  范围内。

随着极化层深度的增加,视电阻率曲线对于有无极化层时的差异逐渐减小,且影响的异常频带也相对变窄。除此之外,第三层存在极化的视电阻率值高于无极化时的频带范围也小于极化层位于第二层时的情形,且同样呈现出向低频偏移的趋势,与前面的研究结果具有相似性。

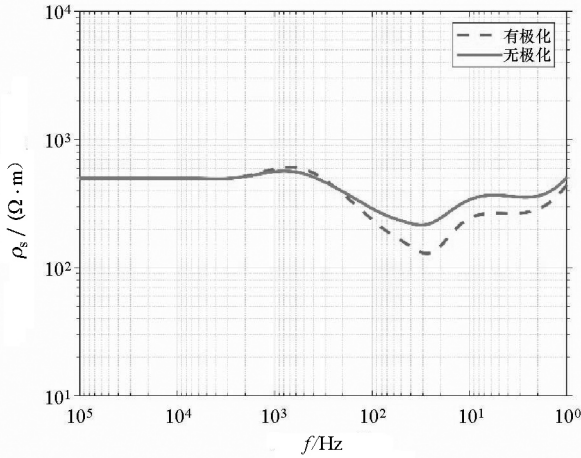


图 18 HAK 型地电模型极化层位于第二层时的视电阻率  
Fig. 18 Apparent resistivity of HAK-type geoelectric model when the polarization layer is located in the second layer

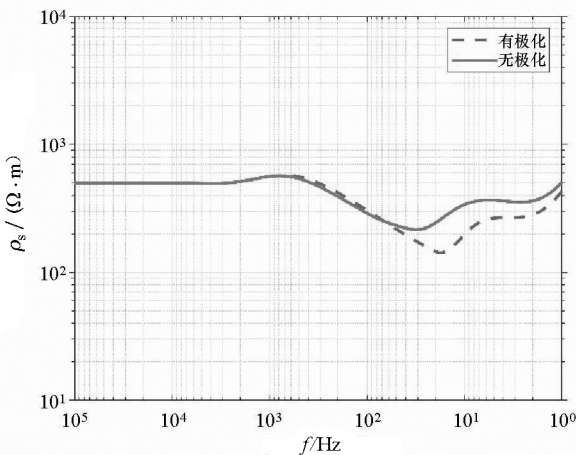


图 19 HAK 型地电模型极化层位于第三层时的视电阻率  
Fig. 19 Apparent resistivity of HAK-type geoelectric model when the polarization layer is located in the third layer

### 3.4.3 极化层位于深层

由图 20 可以看出,当极化层位于 HAK 型断面深层时,能观察到由极化效应产生的视电阻率差异

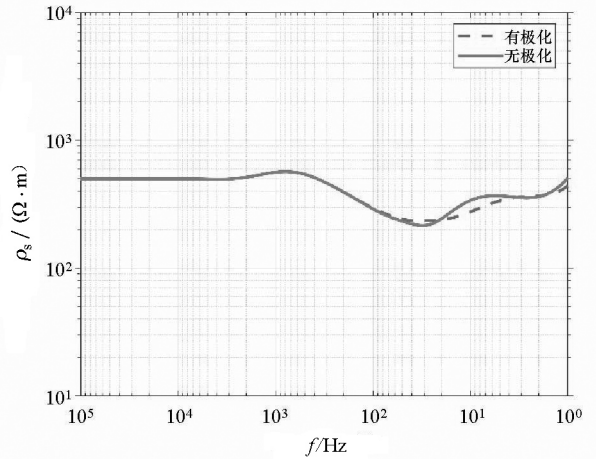


图 20 HAK 型地电模型极化层位于第四层时的视电阻率  
Fig. 20 Apparent resistivity of HAK-type geoelectric model when the polarization layer is located in the fourth layer

的频带范围变得更窄,主要体现在  $f < 10 \text{ Hz}$  的低频范围内<sup>[11]</sup>。

## 4 结论

本文基于 Java 语言的 GUI 图形用户界面,开发了一套 CSAMT 一维数据正演可视化软件,界面友好,自动化程度高,绘图功能与通用性强。通过理论模型的正演计算,验证了软件的正确性与便利性。通过使用 Cole-Cole 模型,研究了一维层状介质极化层分别位于不同深度时的视电阻率曲线的变化特征,研究发现极化层埋藏深度越浅,极化效应对 CSAMT 的影响频段越宽,有无极化的差异也越明显。当极化层存在并且位于中间层和深层时,视电阻率值会出现先高于然后再低于无极化的现象,特别是当极化层位于第二层时这种现象尤为明显。随着极化层埋藏深度的增加,出现视电阻率差异的位置越向低频偏移,并且这种差异越来越小。这些结论对于认识含极化效应的 CSAMT 方法的电磁响应特征,提高野外工作效率和资料处理与解释精度都有较大的意义。

### 参考文献 (References):

[1] 龚强,胡祥云,孟永良. 基于快速汉克尔变换算法的 CSAMT 一维正演[J]. 煤田地质与勘探,2008,36(1):71-73.  
Gong Q, Hu X Y, Meng Y L. Linear dimension forward solution of CSAMT by Hankel transformation method[J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(1):71-73.

[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.  
Tang J T, He J S. Theory and application of CSAMT method[M].

- Changsha: Central South University, 2005.
- [3] 王佳宝. CSAMT 二维反演程序设计与实现[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.  
Wang J B. Design and implementation of CSAMT two-dimensional inversion program[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [4] 张健. 可控源音频大地电磁法一维正反演研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.  
Zhang J. Research on one-dimensional forward and inversion of CSAMT method[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [5] 王珺璐, 刘明文, 李荡, 等. 基于 Cole-Cole 复电阻率模型的线源可控源有限元数值模拟[J]. 物探化探计算技术, 2015, 37(1): 32-39.  
Wang J L, Liu M W, Li D, et al. Finite element numerical simulation on line controlled source based on Cole-Cole model[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 37(1): 32-39.
- [6] 唐睿, 唐新功, 于鹏. CSAMT 正演模拟中激电效应的初步研究[C]//第十届中国国际地球电磁学术讨论会论文集, 2011.  
Tang R, Tang X G, Yu P. The preliminary research on IP effect in CSAMT[C]// Proceedings of The 10th China International Geoelectromagnetic Workshop, 2011.
- [7] 岳安平, 底青云, 王妙月, 等. 油气藏 MT 激电效应一维正演研究[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(3): 364-370.  
Yue A P, Di Q Y, Wang M Y, et al. 1D forward simulation of MT IP effect of reservoir[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(3): 364-370.
- [8] 徐玉聪. 含激电效应的 CSAMT 一维正反演研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.  
Xu Y C. Research on IP effect of one-dimensional forward and inversion of CSAMT[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [9] 侯海涛. Cole-Cole 模型等效模拟瞬变电磁响应[D]. 长沙: 中南大学, 2010.  
Hou H T. Transient electromagnetic simulation response of Cole-Cole model equivalent[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [10] 耿祥义, 张跃平. Java 面向对象程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.  
Geng X Y, Zhang Y P. Java object-oriented programming[M]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [11] 余传涛. 含激电效应的 CSAMT 二维正演与联合反演应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.  
Yu C T. 2D Forward modeling and joint inversion of the CSAMT signal incorporation IP effect[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [12] 蔡盛. 快速汉克尔变换及其在电法正演计算中的应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.  
Cai S. The fast hankel transformation and its applications in electrical exploration forward calculations [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [13] 蔡盛. 快速汉克尔变换及其在正演计算中的应用[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1384-1390.  
Cai S. Fast Hankel transformation and its application in forward computing[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(3): 1384-1390.
- [14] 胡俊, 聂在平. 索末菲尔德积分新方法——快速汉克尔变换[J]. 电子学报, 1998(3): 126-128.  
Hu J, Nie Z P. A new method to calculate Sommerfeld integral: Fast hankel transform [J]. Acta Electronica Sinica, 1998(3): 126-128.
- [15] 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.  
Di Q Y, Wang R. Forward and inversion of CSAMT data and its application[M]. Beijing: Science Press, 2008.

## Visualization design of 1D CSAMT forward modeling and research on the induced polarization effect

ZHONG Hua<sup>1,2</sup>, TANG Xin-Gong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University), Ministry of Education, Wuhan 430100, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Unconventional Oil and Gas in Yangtze University, Wuhan 430100, China)

**Abstract:** This study developed a piece of visualization software of the 1D data forward modeling applicable to the controlled source audio-frequency magnetotellurics (CSAMT). This software has the advantages of friendly interfaces and simple operations. In detail, MATLAB was used to develop the core algorithms, and linear filter coefficients were introduced to solve Hankel integral in the process of forward modeling. Meanwhile, the accuracy of schemes using different linear filter coefficients was compared. The operation interfaces were designed using Java, and multi-parameter setting interfaces with a high automation degree are available. Moreover, the data processing results can be intuitively provided to users using the drawing function of the software. In the calculation process, Cole-Cole model parameters were introduced, and complex resistivity was used to replace the DC resistivity without considering the polarization effect of geoelectric bodies. Furthermore, this study carried out the forward simulation of CSAMT field source on a one-dimensional layered model of induced polarization (IP) media and discussed the IP effect of one-dimensional layered media with polarization layers at different burial depths. It was found that the frequency band of CSAMT affected by the IP effect widened with a decrease in the burial depth of polarization layers. This result is crucial to understanding the electromagnetic response characteristics of the CSAMT method with IP effect and improving the convenience and efficiency of data processing.

**Key words:** 1D forward modeling; Hankel transform; visualization; induced polarization; Java

(本文编辑:沈效群)