

# 电阻率随位置线性变化时的三维大地电磁模拟

鲁来玉<sup>1</sup> 张碧星<sup>1</sup> 鲍光淑<sup>2</sup>

1 中国科学院声学研究所, 北京 100080

2 中南大学资源环境与建筑工程学院, 长沙 410083

**摘要** 采用积分方程法实现了对三维体电磁散射的数值模拟研究. 在分析电张量格林函数的基础上, 针对大地电磁情形, 进行了数值模拟研究. 分析了异常体的横向走向长度对电磁响应的影响, 特别对电阻率作线性变化的异常体进行了数值分析, 并得到了相应测深曲线. 对三维电磁测深进行了分析, 考察了地层参数的影响, 得到了一些重要结果.

**关键词** 三维大地电磁模拟 解析式 积分方程法 张量格林函数

文章编号 0001-5733(2003)04-0568-08 中图分类号 P631 收稿日期 2002-03-19, 2003-03-27 收修定稿

## MODELING OF THREE-DIMENSIONAL MAGNETOTELLURIC RESPONSE FOR A LINEAR EARTH

LU LAIYU<sup>1</sup> ZHANG BIXING<sup>1</sup> BAO GUANGSHU<sup>2</sup>

1 Institute of Acoustics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

2 College of Resources, Environment and Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** Numerical algorithm of three-dimensional electromagnetic modeling using integral equation is realized based on the electrical tensor Green's function when the apparent resistivity varies linearly in both the horizontal and vertical directions. The effects of the dimension of the anomaly strike on the scattering fields are studied. Three-Dimensional electromagnetic sounding profiles are analyzed. We have also considered the effect of formation parameters on magnetotelluric response, and obtained some important results.

**Key words** Three-dimensional magnetotelluric modeling, Analytic expression, Integral equation approach, Tensor Green's function.

### 1 引言

自 20 世纪 70 年代以来, 国内外学者对三维电磁模拟开展了广泛的研究<sup>[1~16]</sup>. Raiche<sup>[1]</sup> 采用积分方程法, Hohmann 等<sup>[2~4]</sup> 对激发极化和大地电磁的情形在频率域中做了数值模拟研究, 之后, SanFillipo 等<sup>[5]</sup> 又开展了时间域中的三维电磁模拟工作. 在此基础上, Zhdanov<sup>[6]</sup> 和 Zonghou 等<sup>[7]</sup> 对积分方程数值

处理时, 采用了各种近似方法, 在保证足够精度的条件下, 大大提高了计算速度. 李晓波等<sup>[8,9]</sup> 应用积分方程法, 徐世浙<sup>[10]</sup> 应用有限元和边界元法, 开展过这方面的研究工作. 在上述工作中, 都假定异常体的电阻率参数是均匀或分块均匀的, 比如 Zhdanov<sup>[6]</sup> 和 Zonghou Xiong<sup>[7]</sup> 曾考虑了两个或多个电阻率均匀的异常体情形. 然而, 实际中遇到的异常体电阻率都是位置坐标的复杂函数, 很少有电阻率为常数的情形. 最近阮百尧等<sup>[11,12]</sup> 采用有限元法对电阻率连续变化

基金项目 国家自然科学基金资助项目(10134020).

作者简介 鲁来玉, 男, 1976 年生, 2001 年获中南大学地球探测与信息技术专业硕士学位, 现为中国科学院声学研究所博士研究生. 主要从事瑞利波理论与应用及三维电磁模拟方面的研究工作. E-mail: laiyulu@hotmail.com

的情形进行研究.但有限元法计算比较复杂,在计算机内存和计算速度上有些限制,而积分方程法具有计算速度快,占用内存少等优点,因而本文采用积分方程法.

## 2 积分方程法基本理论

考虑如图 1 所示的均匀导电半空间中含有一异常体的情况,取时谐因子为  $e^{i\omega t}$ ,忽略位移电流,在频率域中,由 Maxwell 方程组可以得到散射场  $E_s$  满足如下的非齐次矢量方程

$$\nabla \times \nabla \times E_s - k_1^2 E_s = -i \mu J_s, \quad (1)$$

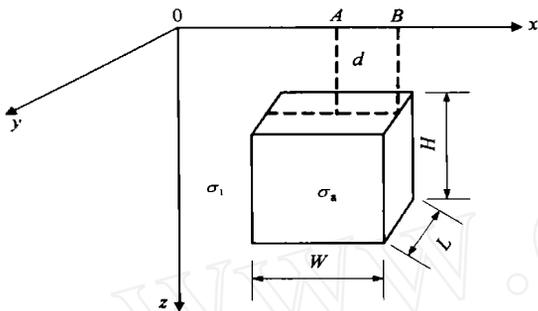


图 1 异常体结构图

Fig. 1 Configuration of anomalous body in a homogeneous half-space

其中  $k_1 = \sqrt{-i\omega\mu\sigma_1}$  为大地中的波数,  $J_s = (\sigma_a - \sigma_1) E$  为等效电流密度,  $\sigma_a$ 、 $\sigma_1$  分别为异常体和均匀大地的电导率,  $\mu$  为大地中的磁导率. 若电张量格林函数  $G$  由下式定义<sup>[13~15]</sup>

$$\nabla \times \nabla \times G - k_1^2 G = I (\delta(r - r')), \quad (2)$$

其中  $I$  为单位张量,  $\delta$  为狄拉克函数. 由此可以得到(1)式的散射场

$$E_s(r) = - \int_V G(r, r') \cdot i \mu J_s(r') dr', \quad (3)$$

这里  $r$  为场点坐标,  $r'$  为源点坐标, 对异常体的体积进行积分. 总的电场表达式可以表示成如下形式

$$E(r) = E^p(r) + \int_V G(r, r') \cdot (k_a^2 - k_1^2) E_s(r') dr', \quad (4)$$

式中  $E^p(r)$  为一次场,  $k_a = \sqrt{-i\omega\mu\sigma_a}$  为异常体内波数. 在对(4)式进行数值计算时,需把(4)式转换为矩阵方程,为此把异常体区域  $V$  分割成  $n$  个小立方体,记  $E_i = E(r_i)$ , 则有

$$E_i = E_i^p + \sum_{j=1}^n A_{ij} \cdot E_j, \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (5)$$

其中  $A_{ij} = \int_V (k_a^2 - k_1^2) G_{ij}(r_i, r) dV$ ,  $E_i$  为观测点值,  $m$  为观测点的个数,  $E_j$  为异常体内点的场. 在数值计算时,可先将观测点置于异常体内,求得异常体内各点的电场  $E_j$ , 然后由(5)式即可求得大地半空间中任意一点电场的三个分量,实现三维电磁散射的数值模拟,这里,关键是求取电张量格林函数的表达式,得到(5)式中  $A_{ij}$  的值.

## 3 数值模拟结果

根据(5)式,对大地电磁情形进行数值模拟研究,电张量格林函数的求取是本方法的难点和重点,对于半空间的情形,电张量格林函数可以解析地给出<sup>[16]</sup>,具体形式见附录 A,求得张量格林函数的元素后,采用计算机数值模拟,能较方便地给出数值结果.

我们将大地电磁场视为垂直向下传入地下的平面波,它可以分为  $E$  偏振和  $H$  偏振两种,即 TE 和 TM 模式,将这两种模式分别作为一次场进行数值模拟,在求得空间总的电磁场后,可由下式得到视电阻率<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} \rho_{xy} = \frac{1}{\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2, & \text{TE 模式} \\ \rho_{yx} = \frac{1}{\mu} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2, & \text{TM 模式} \end{cases} \quad (6)$$

### 3.1 异常体横向走向长度对电磁响应特征的影响

以前,人们对异常体散射问题多局限于一维或二维情况,对于三维体的电磁模拟,虽然有人作过研究和分析,但没有具体应用,若用一维和二维软件进行解释,在很多情况下总是不可靠的.为此,首先考察异常体与测线剖面垂直的水平方向分布长度(即走向,图 1 中的  $L$  方向)对电磁响应的影响,进而说明在什么情况下可以将异常体作为二维体处理,而什么情况下不能作为二维体处理.

图 2 是三维大地电磁模拟的一个数值例子,模型是电阻率为 100 m 的均匀半空间中含有一个电阻率 5 m 的低阻方形异常体,其坐标关系如图 1 所示,异常体的宽  $W = 1\text{km}$ ,高  $H = 1\text{km}$ ,埋深  $d = 0.8\text{km}$ ,一次场由频率为 1Hz 的平面波激发.图中横坐标为沿  $x$  方向的测点,纵坐标为由(6)式测得的视电阻率.图 2a 和 2b 分别为 TE 模式和 TM 模式的结果(异常体中心在地表的投影位于  $x = 5000\text{m}$ ,  $y = 0\text{m}$ ,  $z = 0\text{m}$ 处),为了考察异常体的走向(即和测线

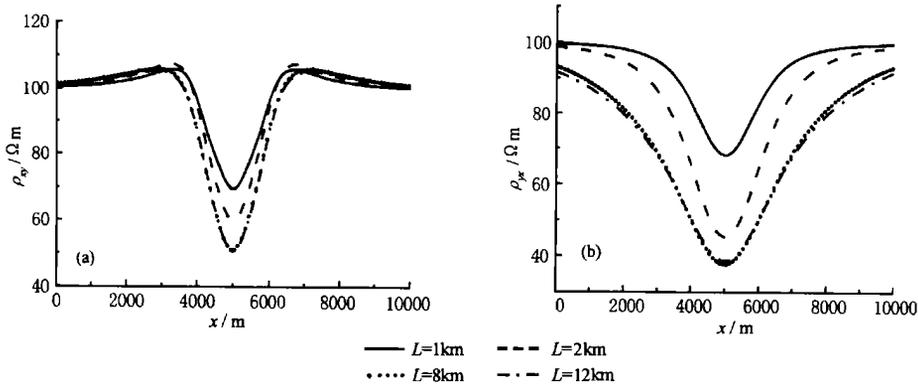


图 2 不同走向长度低阻体的大地电磁响应  
(a) TE 模式; (b) TM 模式.

模型参数:  $W = 1\text{km}, H = 1\text{km}, d = 800\text{m}, a = 5\text{m}$ , 大地电阻率  $\rho_1 = 100\text{m}, f = 1\text{Hz}$ .

Fig. 2 Magnetotelluric response of low-resistivity model having different transverse length

垂直的水平方向上的分布长度)对视电阻率中心剖面曲线的影响,在图中给出了不同走向长度时的结果.由图可以看出,不管是 TE 模式还是 TM 模式,随着异常体走向长度的增加,视电阻率值逐渐降低,异常体的走向长度在 8km 和 12km 时,视电阻率的两条中心剖面曲线几乎重合.说明在这种条件下,当异常体走向长度达到其宽、高及埋深的 8 倍以上时,结果接近于二维时的结果,此时,可以将异常体视为二维结构,能用一般的二维方法来进行实际资料的解释.但当异常体的走向长度与其宽、高及埋深之比在 8 倍以下时,不同走向长度的视电阻率曲线相差较大,这时,就不能用一般的二维方法来进行实际资料的处理解释了.

### 3.2 异常体电阻率在深度(纵向)方向线性变化时的情况

为了接近实际情况,用几种几何参数相同,而电阻率值不同的异常体模型进行分析和对比(见图 3),模型的几何参数为  $W = 1\text{km}, L = 2\text{km}, H = 1\text{km}$ ,埋深  $d = 0.8\text{km}$ .背景电阻率为  $100\text{m}$ ,异常体电阻率的变化情况分别是:模型 1:  $\rho_1 = 5\text{m}$ ;模型 2:电阻率自顶面沿深度  $z$  按  $\rho_2 = 100 - 95(z - d)/H$  线性减少,最底面减至  $5\text{m}$ ;模型 3:  $\rho_3 = 195\text{m}$ ;模型 4:电阻率自顶面沿深度  $z$  向按  $\rho_4 = 100 + 95(z - d)/H$  线性增加,最底面增至  $195\text{m}$ .其中沿深度方向的变化量  $z$  的坐标原点取在地表位置.

图 4 给出 TE 模式,4 种模型在不同频率的平面波激发时,在地表沿  $x$  方向测得的视电阻率中心剖面曲线.由图可以看出,在同一频率情况下,由模型 2 得到的视电阻率异常幅度要比模型 1 小,由模型 4 得到的视电阻率异常幅度要比模型 3 小;对模型 2

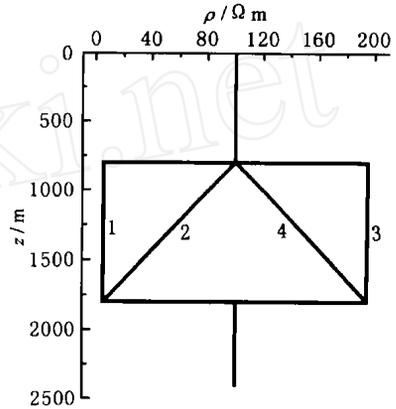


图 3 不同电阻率变化的模型  
图中编号为模型号.

Fig. 3 Models having different resistivity variety

和模型 4,在异常体两侧的视电阻率剖面的前部分比较平缓,不象模型 1 和模型 3 那样明显.而对于同一模型而言,视电阻率的异常幅度随一次场频率的升高而逐渐变小,并且越来越接近于背景场的电阻率.这是因为当频率越高时,视电阻率剖面的曲线特征,越接近地表处的电阻率特征.

图 5 是在频率为 1Hz 时,改变模型的埋深得到的数值模拟结果.对于图中 4 种模型,随着埋深的增加,其视电阻率的异常幅度均逐渐变小.这种变化趋势与固定异常体埋深,增加一次场频率时的变化情况类似,这两种变化的效果是等同的.

### 3.3 异常体电阻率在横向(测线)方向作线性变化时的情况

图 6 中两个模型是异常体的电阻率沿测线方向( $x$  方向)线性变化时的情形.模型 5 自左侧面到右侧面,电阻率按  $\rho_5 = 100 - 95(x - 4500)/W$  线性减少,右侧面减至  $5\text{m}$ ;模型 6 自左侧面到右侧面,电

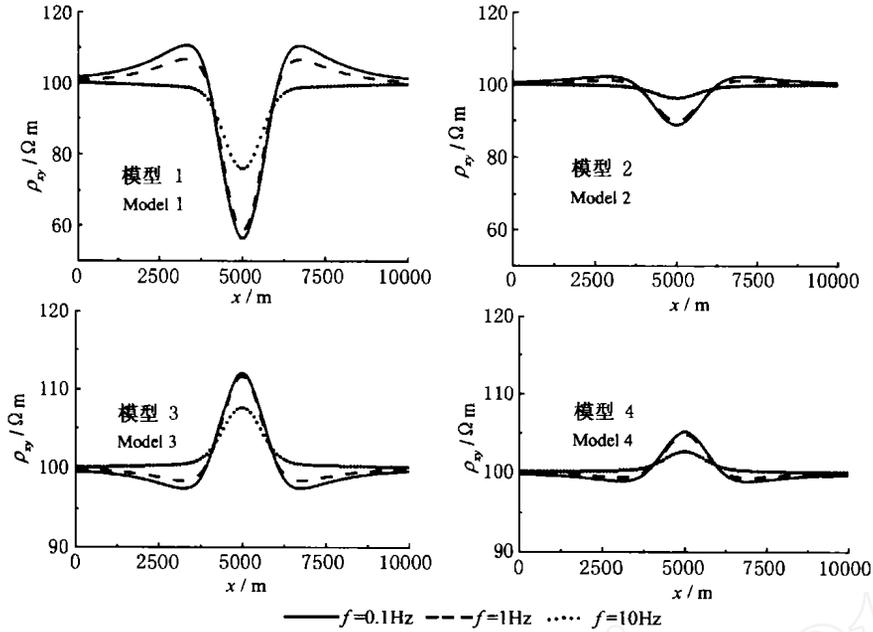


图 4 不同模型在不同频率下的大地电磁响应 (TE)

Fig. 4 Magnetotelluric response of different models at different frequencies

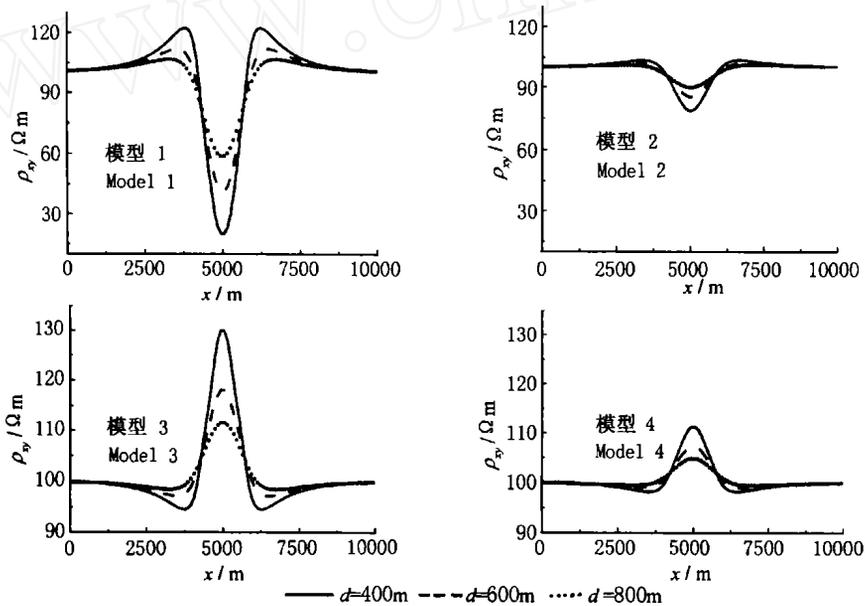


图 5 不同模型在不同埋深下的大地电磁响应

Fig. 5 Magnetotelluric response of different models at different buried depths

阻率按  $\rho_6 = 100 + 95(x - 4500)/W$  线性增加, 右侧面增至 195 m. 它们的几何参数同前 4 个模型.

图 7 给出了埋深为 400m、一次场频率为 1Hz 时, 6 个模型的视电阻率中心剖面曲线. 从图 7 可见, 相对于前 4 个模型来说, 模型 5 与模型 6 的视电阻率异常的最大值点, 不再是异常体中心在地面的投影位置 ( $x = 5000\text{m}, y = 0\text{m}, z = 0\text{m}$ ), 而是沿测线方向向右偏移了. 对于左侧面在地表投影位置 ( $x =$

$4500\text{m}, y = 0\text{m}, z = 0$ ) 附近的隆起部位, 相对于前 4 个模型来说, 也向右偏移了. 即向着异常体电阻率线性增加或线性减少的方向偏移了, 而对于右侧面在地表投影位置 ( $x = 5500\text{m}, y = 0\text{m}$ ) 附近的隆起部位, 则没有明显的改变. 这样就导致了模型 5 和模型 6 的视电阻率中心剖面曲线的异常不对称, 这是因为在左侧面附近, 异常体电阻率处于线性变化的起始端, 异常体的电阻率接近大地电阻率. 因此, 沿

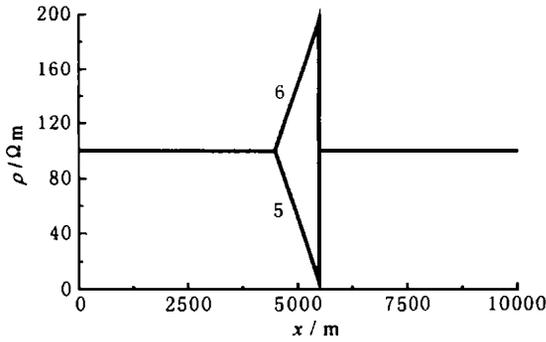


图 6 沿测线方向( $x$  方向)电阻率为线性变化的模型  
图中编号为模型号

Fig. 6 The model having linear variant resistivity  
along  $x$ -direction

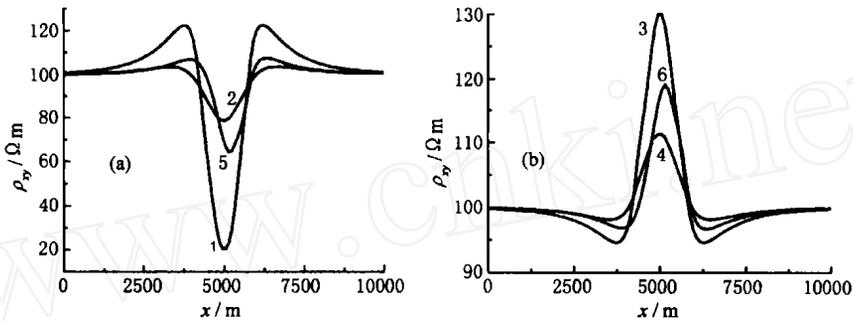


图 7 6 个模型的大地电磁响应 ( $d = 400\text{m}$ ,  $f = 1\text{Hz}$ , 图中编号为模型号)

(a) 异常体相对于围岩为低阻; (b) 异常体相对于围岩为高阻.

Fig. 7 Magnetotelluric response of models ( $d = 400\text{m}$ ,  $f = 1\text{Hz}$ )

6 相比就小, 视电阻率的异常幅度也就小.

综上所述, 与异常体电阻率恒定的情况相比, 异常体电阻率随深度呈线性变化时, 其视电阻率的异常幅度明显不等, 但在中心剖面的曲线是对称的; 对于异常体电阻率在测线方向呈线性变化时, 则异常幅度不等, 其视电阻率中心剖面曲线是不对称的.

### 3.4 大地电磁频率测深曲线特征

图 8 为在图 1 中相应 A 点和 B 点的视电阻率

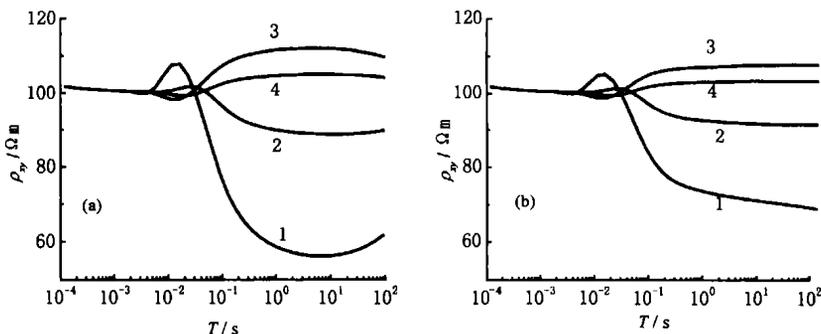


图 8 不同模型在图 1 所示的 A, B 两点的频率测深曲线 ( $d = 800\text{m}$ , 图中编号为模型号)

(a) A 点; (b) B 点.

Fig. 8  $\rho_{xy} - T$  curves at locations A and B (see Fig. 1) for different models

$x$  方向测量视电阻率时, 只有当越过了左侧面在地表的投影位置, 直到异常体的电阻率变化到与大地电阻率相比足够大时, 在曲线的特征上, 才表现出明显的隆起. 右侧面异常体电阻率与大地电阻率相比是突变的, 这一点与模型 1、2、3、4 类似, 因此, 曲线的变化特征在右侧面附近也类似.

由图 7 还可以看出, 模型 5 和模型 6 相对于模型 2 和模型 4 来说, 异常的幅度较大, 这是由于异常体下部的电阻率相对于上部的电阻率对地表的影响较小. 模型 2 和模型 4, 异常体的电阻率是沿深度方向作线性变化的, 在异常体的上部, 异常体电阻率比模型 5 和模型 6 更接近大地电阻率, 因此从整体效应来说, 它们对视电阻率的影响, 与模型 5 和模型

随入射平面电磁波周期的变化情况. 在周期为  $10^{-2}$  s 之前,  $\rho_{xy}$  的大小在背景电阻率 100  $\Omega\text{m}$  左右, 当周期增至  $10^{-2}$  s 左右时, 对随深度呈线性变化的模型 2 和模型 4, 隆起部位的异常幅度明显小于模型 1 和模型 3 (电阻率为常数时) 的幅度, 而且电阻率随入射波周期的变化也较为缓慢. 电磁波穿透深度与入射波周期有关, 但在三维非均匀半空间中, 穿透深度与入射波周期的关系比较复杂, 有待深入研究. 一

般情况下,入射波周期增加,穿透深度也增加,因此图 8 在某种程度上也可以理解为测深曲线。

### 4 结 语

4.1 采用积分方程法实现了三维电磁散射的数值模拟,考察了异常体横向走向长度对电磁响应特征的影响,特别分析了异常体电阻率呈线性变化时的散射场特性,研究了一些参数对散射场的影响,得到了一些重要结论。

4.2 对于异常体电阻率恒定的情形,当异常体的走向长度达到其宽、高及埋深的 8 倍时,其视电阻率异常与走向无限长的二维体相差不多,可以将异常体作为二维体处理。

4.3 对于异常体电阻率沿深度方向呈线性变化时,其视电阻率异常幅度与异常体电阻率恒定时有明显区别,但在中心剖面上是对称的,而对于异常体电阻率在横向(测线方向)呈线性变化时,其曲线是不对称的。

### 附录 均匀半空间中电张量格林函数的解析表达式

频率域中电张量格林函数  $G$  的表达式可以写成一次场  $G^p$  和二次场  $G^s$  和的形式<sup>[2,13]</sup>

$$G = G^p + G^s, \tag{A1}$$

其中

$$G^p = \left( \begin{array}{ccc} G + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{x-x}{k_1^2} \right]_1 & \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{x-x}{k_1^2} \right]_1 & \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{x-x}{k_1^2} \right]_1 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{y-y}{k_1^2} \right]_1 & G + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{y-y}{k_1^2} \right]_1 & \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{y-y}{k_1^2} \right]_1 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{z-z}{k_1^2} \right]_1 & \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{z-z}{k_1^2} \right]_1 & G + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{z-z}{k_1^2} \right]_1 \end{array} \right), \tag{A2}$$

$$G^s = \left( \begin{array}{ccc} 2 + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{x-x}{k_1^2} \right]_3 & \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{x-x}{k_1^2} \right]_3 & \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{x-x}{k_1^2} \right]_4 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{y-y}{k_1^2} \right]_3 & 2 + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{y-y}{k_1^2} \right]_3 & \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{y-y}{k_1^2} \right]_4 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{z+z}{k_1^2} \right]_4 & \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{z+z}{k_1^2} \right]_4 & \frac{-e^{-ik_1 R_s}}{4 R_s} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{z+z}{k_1^2} \right]_4 \end{array} \right), \tag{A3}$$

这里  $G = \frac{e^{-ik_1 R}}{4 R}$ ,  $1 = (ik_1 R + 1) \frac{e^{-ik_1 R}}{4 R^3}$ ,

$$2 = \frac{1}{4} \int_0^\infty \frac{u_1 -}{u_1 +} \frac{1}{u_1} e^{-u_1(z+z)} J_0(\ ) d ,$$

$$3 = \frac{1}{4} \int_0^\infty \left( 2 - \frac{1}{u_1} \right) e^{-u_1(z+z)} J_1(\ ) d ,$$

$$4 = (ik_1 R_s + 1) \frac{e^{-ik_1 R_s}}{4 R_s^3}, u_1 = \sqrt{2 - k_1^2},$$

$$= \sqrt{(x-x)^2 + (y-y)^2}, R = \sqrt{2 + (z-z)^2},$$

$R_s = \sqrt{2 + (z+z)^2}$ . 其中  $(x, y, z)$  为场点坐标,  $(x, y, z)$  为源点坐标。

由(A3)式可以看出,频率域中电张量格林函数的元素中有两项含有贝塞尔函数的积分,对于该积分的数值计算,多采用快速 Hankel 变换的滤波算法<sup>[18~22]</sup>,实际上,对于均匀半空间而言,张量格林函数中的两项含有贝塞尔函数的积分利用已知的积分恒等式

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_0^\infty \frac{1}{u_1} e^{-u_1(z+z)} J_0(\ ) d = \frac{e^{-ik_1 R_s}}{R_s}, \\ \int_0^\infty \frac{1}{u} e^{-u_1(z+z)} J_0(\ ) d = \\ I_0 \left\{ \frac{ik_1}{2} [R_s - (z+z)] \right\} K_0 \left\{ \frac{ik_1}{2} [R_s + (z+z)] \right\}, \\ \text{Im}(k_1) < 0, \text{Re}(u_1) > 0 \end{array} \right. \tag{A4}$$

可以解析地求出. 对于  $3$  中含有的积分项可以化为

$$\left( 2 - \frac{1}{u_1} \right) e^{-u_1(z+z)} J_1(\ ) d = 2 \int_0^\infty e^{-u_1(z+z)} J_1(\ ) d - \int_0^\infty \frac{1}{u_1} e^{-u_1(z+z)} J_1(\ ) d = 2 \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial}{\partial z} [I_0(P) K_0(Q)] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{e^{-ik_1 R_s}}{R_s} \right], \tag{A5}$$

经一系列冗长的推导可以求得

$$3 = \frac{1}{4} \int_0^\infty \left( 2 - \frac{1}{u_1} \right) e^{-u_1(z+z)} J_1(\ ) d = \frac{1}{4} \left[ \frac{2-1}{R_s^3} - \frac{e^{-ik_1 R_s}}{R_s^3} - ik_1 \frac{e^{-ik_1 R_s}}{R_s^2} \right], \tag{A6}$$

其中

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 = PI_1 K_0 + QI_0 K_1 - h(I_0 K_0 - I_1 K_1) \\ h = k_1^2 R_s(z+z)/2 \\ P = ik_1 [R_s - (z+z)]/2 \\ Q = ik_1 [R_s + (z+z)]/2 \end{array} \right. , \tag{A7}$$

这里  $I_n, K_n$  为  $n$  阶第一与第二类虚宗量贝塞尔函数,其宗量分别为  $P$  和  $Q$ .

对于  $2$  中含有的积分项,可以化为

$$\int_0^\infty \frac{u_1 -}{u_1 +} \frac{1}{u_1} e^{-u_1(z+z)} J_0(\ ) d = \frac{2}{k_1^2} \int_0^\infty e^{-u_1(z+z)} J_0(\ ) d - \frac{2}{k_1^2} \int_0^\infty u_1 e^{-u_1(z+z)} J_0(\ ) d - \int_0^\infty \frac{1}{u_1} e^{-u_1(z+z)} J_0(\ ) d , \tag{A8}$$

类似于前面的讨论,可以得到

$$\begin{cases} \int_0^{\infty} e^{-u_1(z+z')} J_0(\dots) d\dots = 2S_1 - S_2, \\ \int_0^{\infty} u_1 e^{-u_1(z+z')} J_0(\dots) d\dots = - (i k_1 R_s + 1) \frac{e^{-i k_1 R_s}}{R_s^3} + \\ (3i k_1 R_s - k_1^2 R_s^2 + 3) \frac{(z+z')^2 e^{-i k_1 R_s}}{R_s^5}, \\ \int_0^{\infty} \frac{1}{u_1} e^{-u_1(z+z')} J_0(\dots) d\dots = \frac{e^{-i k_1 R_s}}{R_s}, \end{cases} \quad (A9)$$

故有

$$\begin{aligned} 2 &= \frac{1}{4} \int_0^{\infty} \frac{u_1}{u_1 +} \frac{1}{u_1} e^{-u_1(z+z')} J_0(\dots) d\dots \\ &= \frac{1}{4} \left[ \frac{2}{k_1^2} (2S_1 - S_2) - \frac{2}{k_1^2} \left( \frac{1}{R_s^3} - \frac{(z+z')^2}{R_s^4} \right) + \right], \end{aligned} \quad (A10)$$

其中:  $1 = i k_1 R_s + 1$ ,  $2 = 3i k_1 R_s - k_1^2 R_s^2 + 3$ ,  $3 = -\frac{e^{-i k_1 R_s}}{R_s}$ ,

$S_1 = \frac{1}{R_s^3}$ ,  $S_2 = \frac{3}{R_s^5} (1 - R_s^2)$ ,  $2 = h \left[ g(I_0 K_1 - I_1 K_0) - 2I_1 K_1 \right]$ ,  
 $g = i k_1^2 / R_s$ , 式中其余各参量同(A6)式。这样频率域中的张量格林函数元素中含有的  $2$  和  $3$  均可以解析地给出,而不必用数值积分或 Hankel 变换的数字滤波算法求解含有贝塞尔函数的积分。

## 参考文献

- [1] Raiche A P. An Integral equation approach to three-dimensional modeling. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1974, **36**:363 ~ 376
- [2] Hohmann G W. Three-dimensional induced polarization and electromagnetic modeling. *Geophysics*, 1975, **40**(2):309 ~ 324
- [3] Ting S C, Hohmann G W. Integral equation modeling of three-dimensional magnetotelluric response. *Geophysics*, 1981, **46**(2):182 ~ 197
- [4] Wannamaker P E. Advanced in three-dimensional magnetotelluric modeling using integral equations. *Geophysics*, 1991, **56**(11):1716 ~ 1728
- [5] SanFilipo W A, Hohmann G W. Integral equation solution for the transient electromagnetic response of a three-dimensional body in a conductive half-space. *Geophysics*, 1985, **50**(5):798 ~ 809
- [6] Zhdanov M S, Fang S. Quasi-linear approximation in 3-D electromagnetic modeling. *Geophysics*, 1996, **61**(3):646 ~ 665
- [7] Xiong Zonghou. Electromagnetic modeling of 3-D structures by the method of system iteration using integral equations. *Geophysics*, 1992, **7**(12):1556 ~ 1561
- [8] 李晓波, 朴化荣. 两层大地中三维体的激发极化与电阻率响应的积分方程模拟. *地球物理学报*, 1988, **31**(3):342 ~ 352  
 LI Xiaobo, PIAO Huarong. Induced polarization and resistivity modeling of three-dimensional bodies in two-layered earth using integral equation. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)*, 1988, **31**(3):342 ~ 352
- [9] 朴化荣, 薛爱民, 金东等. 积分方程法求解三度极化体的激发极化效应. *物探化探计算技术*, 1985, **7**(4):310 ~ 325  
 PIAO Huarong, XUE Aimin, JIN Dong, et al. Computation of the IP

- response of three-dimensional polarizable bodies using integral equation. *Computing Technique for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 1985, **7**(4):310 ~ 325
- [10] 徐世浙. 地球物理中的有限元法. 北京: 科学出版社, 1994. 178 ~ 189  
 XU Shizhe. The Finite Element Method in Geophysics. Beijing: Science Press, 1994. 178 ~ 189
- [11] 阮百尧, 徐世浙. 电导率分块连续变化二维地电断面电阻率测深有限元数值模拟. *地球科学*, 1998, **23**(3):303 ~ 307  
 RUAN Baiyao, XU Shizhe. FEM for modeling resistivity sounding on 2-D geoelectric model with line variation of conductivity within each block. *Earth Science*, 1998, **23**(3):303 ~ 307
- [12] 阮百尧, 熊彬. 电导率连续变化的三维电阻率测深有限元模拟. *地球物理学报*, 2002, **45**(1):131 ~ 138  
 RUN Baiyao, XIONG Bin. A finite element modeling of three-dimensional resistivity sounding with continuous conductivity. *Chinese J. Geophys.*, 2002, **45**(1):131 ~ 138
- [13] 鲁来玉, 张碧星, 鲍光淑等. 均匀导电半空间中频率域和时间域三维电张量格林函数及其应用. *物探化探计算技术*, 2000, **22**(2):120 ~ 126  
 LU Laiyu, ZHANG Bixing, BAO Guangshu, et al. Time-domain and frequency domain three-dimensional tensor Green's function in a homogeneous conductive half-space and its application. *Computing Technique for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 2000, **22**(2):120 ~ 126
- [14] 张碧星, 鲁来玉, 鲍光淑等. 电张量格林并矢与三维电磁模拟. *中南工业大学学报(自然科学版)*, 1999, **30**(6):575 ~ 577  
 ZHANG Bixing, LU Laiyu, BAO Guangshu, et al. Tensor Green dyadic and three-dimensional electromagnetic simulation. *J. Cent. South. Univ. Technol.* (in Chinese), 1999, **30**(6):575 ~ 577
- [15] 鲍光淑, 张碧星, 敬荣中等. 三维电磁响应积分方程法数值模拟. *中南工业大学学报(自然科学版)*, 1999, **30**(5):472 ~ 474  
 BAO Guangshu, ZHANG Bixing, JING Rongzhong, et al. Numerical modeling for 3-D EM responses using integral equation solution. *J. Cent. South. Univ. Technol.* (in Chinese), 1999, **30**(5):472 ~ 474
- [16] 雷银照, 马信山. 均匀半空间导电体的并矢格林函数解析式. *地球物理学报*, 1997, **40**(2):265 ~ 271  
 LEI Yinzhaoh, MA Xinshan. An analytical formula of dyadic Green's function for homogeneous half-space conductor. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)*, 1997, **40**(2):265 ~ 271
- [17] 傅良魁主编. 应用地球物理教程 - 电法, 放射性, 地热. 北京: 地质出版社, 1991  
 FU Liangkui. Textbook of Applied Geophysics - Electromagnetism, Radioactivity, Geothermy (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1991
- [18] Johansen H K, Sorensen K. Fast Hankel transforms. *Geophysical Prospecting*, 1979, **27**:876 ~ 901
- [19] Anderson W L. Computation of Green's tensor integrals for three-dimensional electromagnetic problems using fast Hankel transform. *Geophysics*, 1984, **49**(10):1754 ~ 1759
- [20] Anderson W L. Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering. *Geophysics*, 1979, **44**(7):

- 1287 ~ 1305
- [21] Anderson W L. Fast Hankel transforms using related and lagged convolutions. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1982, 8 (4): 344 ~ 368
- [22] 朴化荣,殷长春. 频率测深正演问题滤波算法及人机联作反演. *物探化探计算技术*, 1987, 9(2): 137 ~ 148
- PIAO Huarong, YIN Changchun. Calculation of EM sounding by filtering method and an interactive inversion system. *Computing Technique for Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese)*, 1987, 9(2): 137 ~ 148

## 《地球物理学报》稿约

《地球物理学报》创刊于 1948 年,是中国地球物理学会、中国科学院地质与地球物理研究所联合主办的有关地球物理科学的综合性学术刊物. 主要刊载固体地球物理、应用地球物理、地磁和空间物理、大气和海洋地球物理,以及与地球物理密切相关的交叉学科研究成果的高质量论文. 中文版为双月刊,在国内外发行,并由美国地球物理学家联合会(简称 AGU)同步发行英文网络版. 作者和读者对象主要为从事地球物理学、地球科学及其他相关学科的国内外科技工作者和大专院校师生.

《地球物理学报》荣获首届国家期刊奖和中国科学院优秀期刊特别奖,2001 年进入“中国期刊方阵”被评为“双高期刊”. 2002 年底荣获第二届国家期刊奖. 本刊为中国科技信息研究所信息分析中心、中国科学院引文数据库等的统计源期刊和 SCI 等国际检索系统的源期刊.

### 1 主要栏目

- 1.1 学术论文 报道我国以及国际地球物理各分支学科及相关边缘、交叉学科的重要研究成果,包括具有创新性的基础研究和应用基础研究成果,以及具有重大应用价值的研究成果. 一般不超过 6000 字. 附中、英文摘要约 300 字,关键词 3 ~ 8 个.
- 1.2 综述或评述 介绍国内外地球物理学和相关交叉学科在某一领域或某一专题的最新研究进展或评述. 6000 字以内,其余要求同 1.1.
- 1.3 研究短论 快捷报道地球物理学领域和相关交叉学科某项研究的重要阶段性成果,或主要结论,或重要发现. 3000 字左右.
- 1.4 科学论坛 开展对地球物理学和相关交叉学科以及对本刊文章某一学术观点的讨论,一般 3500 字以内.
- 1.5 学术动态 国内外有关地球物理学学术活动的报道. 一般 800 字以内.“1.2”~“1.5”为不定期栏目.

### 2 稿件要求

- 2.1 文稿观点明确,论据可靠,层次分明,论述精练,语言准确,符合规范,求真反伪,文责自负.
- 2.2 量、符号和单位采用国家标准《量和单位》. 量符号、代表变动性数字的符号以及坐标轴的符号均排斜体;矢量、张量排黑斜体;量符号的下标,凡用以上符号者排斜体,其他情况排正体. 量符号在文中首次出现时,必须给出其量名称及单位. 单位一律采用国际符号,排正体. 地球物理学中常用的数学符号(自然对数的底  $e$ , 圆周率  $\pi$ , 转置  $T$ , 虚数  $i$ ,  $d$  中的  $d$ ,  $dx$  中的  $d$ ,  $\partial x$  中的  $\partial$  等)均排正体. 外文缩写词必须符合国际规范,在文中第一次出现时要说明中文含义.
- 2.3 图件 附最必要的图,一般不超过 6 幅,每幅注明图号. 要求图件具科学性,符合规范,清晰美观,能直接用于制版. 坐标轴标目的书写以规范形式“量符号/单位”表示,如  $f/\text{Hz}$ ,  $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ . 图中内容要中、英文并列给出. 对于涉及国界的图件,必须绘制在地图出版社出版的最新地图上,或通过 [www.shsm.gov.cn](http://www.shsm.gov.cn) 下载. 在正文中标示图的位置(画框示意),框的下方写明图号、图题和图注(中、英文并列).
- 2.4 表格 采用三线表,必要时加辅线. 表号和表题置于表的上方(中、英文并列). 表中量和单位的标示形式同图. 表直接列于文中,勿另置. 注意表与图的内容勿重复.
- 2.5 参考文献 遵循著作权法,凡引用他人资料、数据、方法、图表以及结果、结论的,必须注明出处,列出文献,涉及版权事宜作者自负. 参考文献的著录格式本刊采用“须序编码制”,著录格式详见“《地球物理学报》文后参考文献著录格式”.
- 2.6 提交文稿研究工作的基金来源(批准号),以及 100 字以内的第一作者简介.

### 3 注意事项

- 3.1 来稿一式 2 份,计算机打印.
- 3.2 投稿者可建议 3 ~ 5 名评审者(请注明学位、职称、研究领域、单位和通讯处),以及要求回避的评审者. 供编辑部参考.
- 3.3 来稿如不符合以上要求,将退作者修改后再投. 自留稿件底稿,刊用与否恕不退稿. 作者收到本刊回执后 3 个月未接到录用通知时,可自行处理,并请告之编辑部,双方有约定者除外. 勿一稿多投.
- 3.4 来稿一经发表,酌寄稿酬并酌收版面费. 赠送抽印本 20 份及样刊.

来稿请寄:北京 9825 信箱《地球物理学报》编辑部 邮 编:100029.

电 话:62007700,62007709

E - mail:actageop@mail.igcas.ac.cn