

文章编号: 1674-9057(2017)02-0265-09

doi: 10.3969/j.issn.1674-9057.2017.02.004

基于广义等效 CR 模型的地井、井地激电 2.5 维异常响应分析

吴延强¹ 熊 彬¹ 赵建国² 罗天涯¹ 郭胜男¹ 李长伟¹ 丁彦礼¹ 李静和¹ 陈 欣¹

(1. 桂林理工大学 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

摘 要: 在频率较低和忽略电磁效应的情况下, 利用广义等效介质激电(GEMTIP)模型, 实现了一种频率域中地井、井地 2.5 维复电阻率有限体积正演计算方法。从地井、井地电位满足的边值问题出发, 将 GEMTIP 模型的频率响应引入到地电模型中, 推导出有限体积各控制容积所满足的离散方程式; 利用预处理迭代算法对大型稀疏线性方程组进行求解, 通过对比两层大地模型的数值解与解析解, 验证该算法的正确性; 最后构建若干个典型多相态复合地电模型进行试算, 并且在一定频段内计算所得场值异常分布明显。结果表明, 联合地井、井地装置对基于 GEMTIP 模型的异常体探测是有效的。

关键词: 地井; 井地; 复电阻率; GEMTIP 模型; 有限体积

中图分类号: P631

文献标志码: A

井中激发极化法^[1]主要包括地表-井中、井中-地表、井中-井中 3 种工作方式。为了深入研究岩矿石的激电效应, 前人提出了复电阻率法(complex resistivity, CR), 该方法是一种利用岩矿石相关物性参数差异对异常体进行区分勘探, 通过测量一系列频点上地下介质复电阻率的虚、实分量(或振幅、相位)达到寻找电性异常体的目的。在复电阻率法的研究上, 国内外学者均是通过岩(矿)石激电效应进行等效处理, 从而计算出岩(矿)石激电效应的振幅谱以及相位谱。随着研究的深入, 关于岩石频散特性的研究已经趋于完善, 而对其微观机理的研究较少, 如关于孔隙度对介质复电阻率频散规律的影响。对岩(矿)石复电阻率的频散特性微观机理的研究, 通过等效电路的方式建立了相应的数学模型, 其中比较经典的复电阻率模型是 Pelton 等^[2-3]提出的 Cole-Cole 模型, 以

及 Wait 模型、Dias 模型, 这些模型都是利用岩、矿石离子的电化学性质通过物理等效而来, 是在微粒或者显微尺度下对激发极化效应进行的近似研究。张桂青等^[4]实现由视谱直接反演真谱参数的实用方法; 苏朱刘等^[5]基于复电阻率法研究了一定深度范围内激电异常的纵、横向变化特征; 陈蜀雁等^[6]基于双频激电法在阿勒泰山区开展了快速找矿评价研究; 肖占山等^[7-8]进行了井眼环境岩石频散实验研究, 以及验证了采用电极型电极系结构进行复电阻率测井的可行性; 戴前伟等^[9]开展了双频激电井地电位探测, 得到了地表的电位差分布图, 认为采用双频激电测井研究剩余油分布是可行的; 蓝常斌等^[10]进行了时域激电数据的 Cole-Cole 模型参数反演与应用; 胡英才等^[11]在安徽铜陵舒家店铜矿开展了基于可控源音频大地电磁法和复电阻率法的综合研究。

收稿日期: 2016-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41164004; 41674075); 广西自然科学基金项目(2013GXNSFAA019277; 2016GXNSFGA380004); 桂林市“漓江学者”(2013)项目; 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目

作者简介: 吴延强, (1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电磁法数值模拟, 942984573@qq.com。

通讯作者: 熊彬, 博士, 教授, xiongbn@msn.com。

引文格式: 吴延强, 熊彬, 赵建国, 等. 基于广义等效 CR 模型的地井、井地激电 2.5 维异常响应分析 [J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(2): 265-273.

为了将岩石学相关参数运用到激电模型,以及在相应的模型中将岩、矿石的一些基本结构及岩石学特征在宏观尺度进行表示,Zhdanov等^[12-14]通过对大量的不同种类的岩、矿石进行测量,运用广义等效介质理论推导出了一种用以描述岩、矿石激发极化效应的GEMTIP模型,该模型将岩、矿石的物理属性相关联,该模型的出现为区分多相复合岩、矿石提供了一种定量的分析方法。Revil等^[15-16]将其理论运用于实际中并取得令人满意的效果;刘云龙等^[17]结合与斑岩型铜矿的相关岩石学物性参数,对该类型矿石的频谱特性进行研究;刘云龙等^[18]进行了地-井、井-地有限体积IP异常响应分析。由于将GEMTIP模型运用于井中激电测量研究较少,笔者在前人的基础上,从地井、井地电位满足的边值问题出发,将GEMTIP模型的频率响应引入到地电模型中,利用具有离散形式简单、计算精度较高、各项具有明确物理意义的有限体积法^[19]进行正演计算,分析多种相态异常体响应特征,为井中激电测量提供更多新的思路。

1 GEMTIP 模型

将岩石中的矿物基质视为不同半径球形颗粒时,结合相关的岩石学及流变特征参数,岩矿石的复电阻率可表示为

$$\rho_f = \rho_0 \left\{ 1 + \sum_{i=1}^N \left[f_i M_i \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau_i)^{C_i}} \right] \right] \right\}^{-1}, \quad (1)$$

式中:

$$M_i = 3 \frac{\rho_0 - \rho_i}{\rho_0 + 2\rho_i}; \quad (2)$$

$$\tau_i = \left[\frac{a_i}{2\alpha_i(\rho_0 + 2\rho_i)} \right]^{1/C_i}. \quad (3)$$

其中: ρ_f 为等效复电阻率; ρ_0 为岩矿石的零频电阻率; f_i 、 M_i 、 τ_i 、 C_i 分别为第 i 种矿物的体积百分数、充电率、时间常数、延迟系数; a_i 、 α_i 、 ρ_i 分别表示第 i 种矿物的颗粒半径、面极化系数、电阻率; ω 为角频率。

为研究矿物颗粒半径与体积百分数对视复电阻率频谱曲线的影响,构建两组 GEMTIP 模型参数, Model 1 中 $\rho_0 = 100 \Omega\text{m}$, $\rho_i = 0.5 \Omega\text{m}$, $f_i = 0.5$, $C_i = 0.8$, $\alpha_i = 0.4 \Omega \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$, 矿物半径分别取 $a_i = 0.5, 1, 3, 5, 10 \text{ mm}$; Model 2 中体积百分数分别取 $f_i = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$, $a_i = 3 \text{ mm}$, 其余参数与 Model 1 参数一致。计算得到的视复电阻率频谱曲线如图 1。

改变矿物颗粒半径或体积百分数,视复电阻率实部均随着频率的增加而减小,最终趋于某一稳定值,矿物颗粒半径越小,曲线开始减小所对应的频率越小(图 1a); 体积百分数越大,曲线趋于稳定的值越小(图 1b)。视复电阻率虚部的值均随着频率的增加先减小后增大,最终均趋于零频电阻率值,矿物颗粒半径越小,曲线达到极小值所对应的频率越小,颗粒半径的变化曲线极小值不变(图 1c); 体积百分数越大,曲线达到极小值越小,

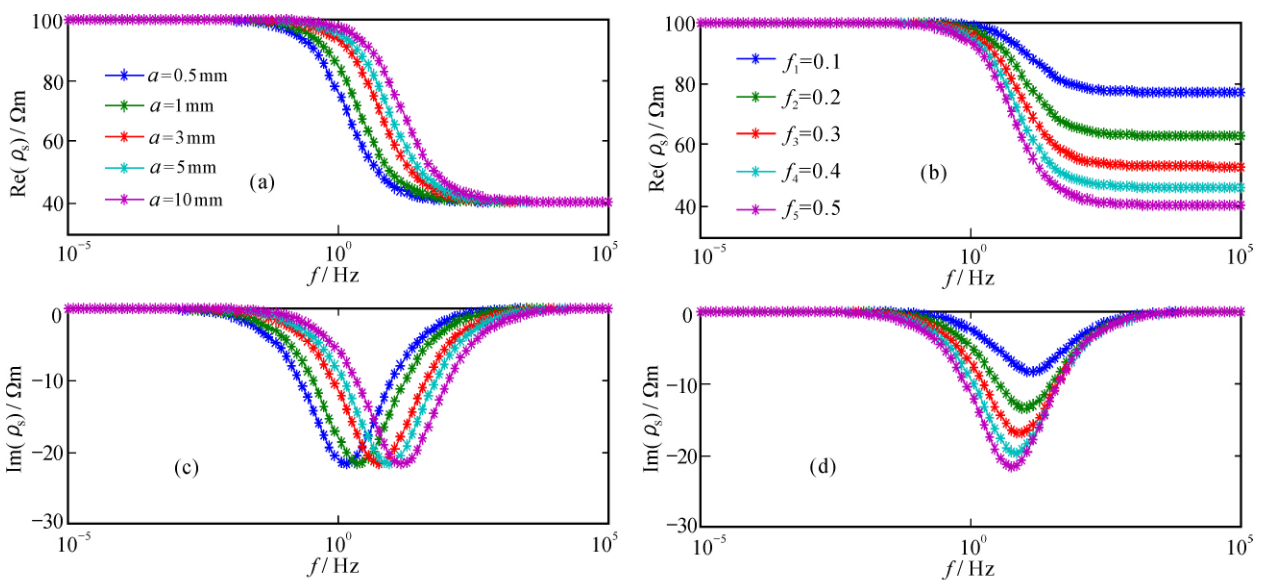


图 1 Model 1 (左列) 与 Model 2 (右列) 频谱曲线
Fig. 1 Spectrum curves of Model 1 (left column) and Model 2 (right column)

(图 1c); 体积百分数越大, 曲线达到极小值越小, 且对应的频率越小(图 1d)。

由此可见, 对不同岩、矿石对应的 GEMTIP 模型, 可通过数值计算后进行差异分析。

2 基于 GEMTIP 模型的复电位微分方程

在频率域复电阻率法中, 忽略电磁耦合效应, 电导率沿走向无变化的地电模型控制微分方程可以表示为

$$\nabla \cdot (\tilde{\sigma} \nabla \tilde{U}) - k^2 \tilde{\sigma} \tilde{U} = -\tilde{I} \delta(A); \quad (4)$$

$$\partial \tilde{U} / \partial n = 0, \in \Gamma_s; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial n} + k \frac{K_1(kr)}{K_0(kr)} \tilde{U} \cos(nr) = 0, \in \Gamma_\infty. \quad (6)$$

其中: ∇ 为二维哈密顿算符; k 为傅氏域波数; $\delta(A)$ 为点源 A 的 delta 函数; $\tilde{\sigma}$ 为复电导率, 由式 (1) 计算得到; \tilde{U} 为复电位; \tilde{I} 是供电电流; K_0 和 K_1 分别为零阶和一阶第二类修正贝塞尔函数; r 为源到边界处的矢径; Γ_s 与 Γ_∞ 分别表示地表边界和无穷边界。

2.1 微分方程离散化

图 2 为二维网格的一部分, 控制容积的形成采用中心式网格, 图中阴影部分为 P 点的控制容积, 在 P 点左、右、上、下方分别有控制节点 W 、 E 、 N 、 S 。

利用有限体积的基本思想, 对式 (4) 两边积分, 得

$$\int_V \nabla \cdot (\tilde{\sigma} \nabla \tilde{U}) dx dz - \int_V k^2 (\tilde{\sigma} \tilde{U}) dx dz = - \int_V \tilde{I} \delta(A) dx dz; \quad (7)$$

根据高斯通量定理有

$$\left[\tilde{\sigma}_e \left(\frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} \right) dz - \tilde{\sigma}_w \left(\frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} \right) dz \right] +$$

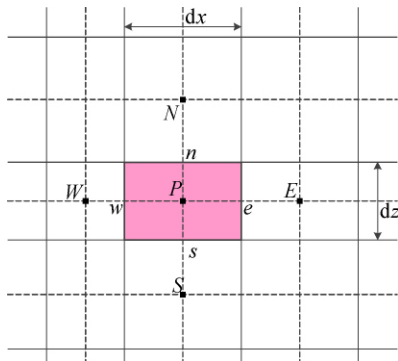


图 2 有限体积二维网格剖分示意图

Fig. 2 Two-dimensional grid system of finite volume

$$\left[\tilde{\sigma}_n \left(\frac{\partial \tilde{U}}{\partial z} \right) dx - \tilde{\sigma}_s \left(\frac{\partial \tilde{U}}{\partial z} \right) dx \right] - k^2 \tilde{\sigma}_p \tilde{U} = -\tilde{I} \delta(A) V_p. \quad (8)$$

式中: $V_p = dx dz$ 为控制容积的大小; $\tilde{\sigma}_e$ 、 $\tilde{\sigma}_w$ 、 $\tilde{\sigma}_n$ 、 $\tilde{\sigma}_s$ 分别为相邻控制容积电导率的面积加权平均值。在式 (8) 中有

$$\tilde{\sigma}_e \left(\frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} \right) dz = \frac{(\tilde{\sigma}_E V_E + \tilde{\sigma}_P V_P)}{(V_E + V_P)} \left(\frac{\tilde{U}_E - \tilde{U}_P}{h_{EP}} \right) dz, \quad (9)$$

其中, h_{EP} 为控制体积 E 到 P 的距离, $h_{EP} = x_{i+1} - x_i$. (10)

同理可得 $\tilde{\sigma}_w (\partial \tilde{U} / \partial x) dz$, $\tilde{\sigma}_n (\partial \tilde{U} / \partial z) dx$, $\tilde{\sigma}_s (\partial \tilde{U} / \partial z) dx$ 。对所有节点进行上述离散, 并对边界节点施加混合边界条件, 即地表单元施加 Neumann 条件, 无穷远单元施加混合边界条件

$$\begin{cases} \partial \tilde{U} / \partial n = 0, \\ \frac{\partial \tilde{U}}{\partial n} + k \frac{K_1(kr)}{K_0(kr)} \tilde{U} \cos(nr) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

其中: n 为外法线方向; r 为测量点到源点的距离即矢径; K_0 和 K_1 分别为零阶和一阶第二类修正贝塞尔函数; θ 为矢径 r 与 n 之间的夹角。最终得到总的有限体积线性方程组:

$$C_e \tilde{U}_E + C_w \tilde{U}_W + C_n \tilde{U}_N + C_s \tilde{U}_S + C_p \tilde{U}_P = F_U, \quad (12)$$

式中:

$$\begin{cases} C_e = \tilde{\sigma}_e \frac{\tilde{U}_E}{h_{EP}} dz, C_w = \tilde{\sigma}_w \frac{\tilde{U}_W}{h_{WP}} dz, \\ C_n = \tilde{\sigma}_n \frac{\tilde{U}_N}{h_{NP}} dx, C_s = \tilde{\sigma}_s \frac{\tilde{U}_S}{h_{SP}} dx, \\ C_p = C_e + C_w + C_n + C_s - k^2 \tilde{\sigma}_p, \\ F_U = -\tilde{I} \delta(A). \end{cases} \quad (13)$$

经整理得到

$$K(\tilde{\sigma}, k) \tilde{U} = P. \quad (14)$$

采用预处理的不完全 LU 分解广义极小残差算法对该线性方程组进行求解后, 运用文献 [20 - 21] 提出的改进波数 k 及加权系数 g 利用

$$\tilde{V} = \sum_{i=1}^n \tilde{U}(k_i) g_i \quad (15)$$

将求得的波数域复电位 \tilde{U} 经过傅里叶反变换得到空间域中各节点的复电位 \tilde{V} 。

2.2 视复电阻率的计算

对于给定的测量装置, 计算出地面各节点的

复电位后可根据

$$\tilde{\rho} = K \tilde{V}(M) - \tilde{V}(N) / \tilde{I} \quad (16)$$

得到视复电阻率 $\tilde{\rho}$ 。式中 K 为装置系数, $\tilde{V}(M)$, $\tilde{V}(N)$ 分别是测量电极 M, N 所在节点的复电位值。

相位可由

$$\varphi = \tan^{-1}(\text{Im}|\Delta\tilde{V}| / \text{Re}|\Delta\tilde{V}|) \quad (17)$$

计算得到。

3 算例

3.1 二层模型

为验证上述算法的可行性, 构建二层地电模型, 假设每一层中只含一种矿物基质, 其 GEMTIP 模型参数如表 1 所示。

设供电频率 $f = 1 \text{ Hz}$, 采用对称二极装置进行测量, 计算得到的视复电阻率值与解析解进行对比, 对比结果如图 3 所示。用有限体积法计算得到的视复电阻率值无论是在实部或虚部上与解析

解拟合效果都很好, 可见该算法在结合 GEMTIP 模型上进行计算是有效的。

3.2 模型 2

均匀大地中赋存三相态异常体的空间展布模型见图 4, 供电频率 f 分别取 1、0.5、0.25、0.125 Hz, 采用地井二极装置进行测量, A 电极移动范围为 $-20 \sim 20 \text{ m}$, 点距为 2 m, 测量电极 M 在 $-2 \sim -30 \text{ m}$ 间观测, 点距 2 m。其中低阻围岩 ρ_f 中只含有一种矿物基质, 高阻异常体 ρ_f 由 2 种矿物基质构成。 ρ_f 与 ρ_f 的 GEMTIP 模型参数见表 2。其中: ρ_0 为岩矿石的零频电阻率; f_1, M_1, τ_1, C_1 为岩矿石中第 1 种矿物基质的体积分数、充电率、时间常数、延迟系数; a_1, α_1, ρ_1 分别表示第 1 种矿物基质的颗粒半径、面极化系数、电阻率; f_2, M_2, τ_2, C_2 为岩矿石中第 2 种矿物基质的体积分数、充电率、时间常数、延迟系数; a_2, α_2, ρ_2 分别表示第 2 种矿物基质的颗粒半径、面极化系数、电阻率。

图 5 可知, 无论是视复电阻率实部或虚部等值

表 1 水平层状模型参数

Table 1 Parameters of horizontal layers model

	$\rho / \Omega\text{m}$	$f_1 / \%$	C_1	$\rho / \Omega\text{m}$	a / mm	$\alpha_1 / (\Omega \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$	h / m
第 1 层	10	5	0.5	0.5	1	8	10
第 2 层	100	40	0.5	0.1	4	5	∞

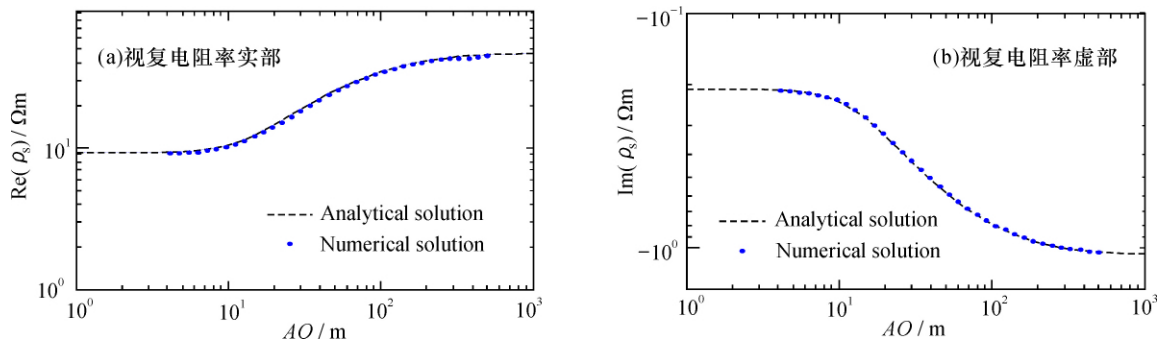


图 3 复电阻率数值解与解析解对比

Fig. 3 Comparison of numerical solution and analytical solution

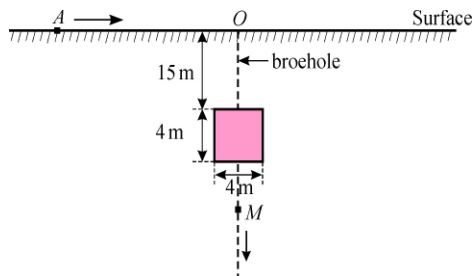


图 4 高阻极化块模型

Fig. 4 High resistivity polarization block model

线图的异常形态均关于井轴对称, 从视复电阻率实部等值线图来看, 高阻体正上方为高阻异常, 最大异常值为 $54.2 \Omega\text{m}$, 正下方呈现低阻异常, 最小异常值为 $45.5 \Omega\text{m}$, 视复电阻率实部等值线在垂向上分布相对密集, 横向上分布较为稀疏, 异常具有厚度较小、宽度较大的特征, 并且形状呈现出扁平的椭圆形, 这一异常特征表明二极地井观测装置对地下地质体的纵向分辨率明显大于其水平

表 2 高阻极化块模型 GEMTIP 参数
Table 2 GEMTIP parameters of high resistivity polarization block model

参数	低阻围岩 ρ_{f_1}	高阻异常体 ρ_{f_2}
$\rho_0 / \Omega m$	50	500
$f_1 / \%$	5	20
$f_2 / \%$	-	35
C_1	0.6	0.8
C_2	-	0.6
$\rho_1 / \Omega m$	0.01	0.1
$\rho_2 / \Omega m$	-	0.01
a_1 / mm	0.5	0.4
a_2 / mm	-	0.5
$\alpha_1 / (\Omega \cdot m^2 \cdot s^{-2})$	0.5	0.3
$\alpha_2 / (\Omega \cdot m^2 \cdot s^{-2})$	-	0.8

分辨率。高低阻异常区中心连线垂直与高阻体，高低阻异常交界处与高阻体埋深一致，而视复电阻率虚部为负值，高阻体正上方呈现低阻异常，而正下方异常呈宽度较大的高阻异常，低阻异常在 $x = -5 \sim 5 m, z = -15 m$ 处有下凸的形态，这与高阻体的水平分布有一定联系。从整体上看，随着频率的增加，视复电阻率实部与虚部分量均增加，异常区域的轮廓逐渐变得清晰，相对而言，虚部增加的幅度较实部大。

3.3 模型 3

低阻极化块模型的空间展布情况及观测方式、供电频率如模型 2 所示，其中高阻围岩 ρ_{f_1} 中只含有一种矿物基质，低阻异常体 ρ_{f_2} 由两种矿物基质构成。 ρ_{f_1} 与 ρ_{f_2} 的 GEMTIP 模型参数如表 3 所示。

从图 6 可知，视复电阻率实部与虚部等值线图的异常形态均关于井轴对称，就视复电阻率实部而言，低阻体正上方与低阻异常区中心相对应，低阻异常区的范围为 $x = -12 \sim 12 m, z = -13 \sim -16 m$ ，异常区厚度与低阻体厚度基本一致；对于视复电阻率虚部，在 $x = -12 \sim 12 m, z = -15 \sim -19 m$ 区域内呈现低阻异常，低阻体中心埋深与异常区中心相对应，异常区厚度与低阻体厚度一致，从整体上看，异常区均呈扁而宽的椭圆形。

3.4 模型 4

均匀大地中赋存两个两相态异常体的空间展布模型 (图 7)，其中 $\rho_{f_0} = 50 \Omega m$ ，供电频率 f 分别取 1、0.5、0.25、0.125 Hz，采用井地二极装置进行测量，A 电极移动范围为 $-1 \sim -15 m$ ，点距为 1 m，测量电极 M 在 $-15 \sim 15 m$ 间观测，点距

为 1 m。其中围岩 ρ_{f_0} 中不含矿物基质，无极化效应。低阻异常体 ρ_{f_1} 与高阻异常体 ρ_{f_2} 中均含有一种矿物基质，相应的 GEMTIP 模型参数如表 4 所示。

从图 8 中可以看到，两个两相异常体视振幅与视相位对低阻异常体均有异常响应，对于视振幅等值线图而言，在 $x = -4 \sim -2 m, z = -4 \sim -6 m$ 的区域内呈现低阻异常，异常区向井轴倾斜，与水平方向夹角约 30° ，对于高阻部分无明显的异常响应；而对于视相位等值线图，在 $x = -4 \sim -2 m, z = -5 \sim -7 m$ 区域内呈现的高相位异常，异常区中心与实际异常体埋深基本一致，在 $x = 4 \sim 15 m, z = -5 \sim -15 m$ 处为低相位异常区，高低相位异常区的中心连线正好穿过高阻异常体中心。随着频率的增加，视振幅异常变化不大，而视相位异常等值线在低相位部分有明显变化。因此，可根据视相位等值线图可对高低阻异常体进行定量区分。

4 结 论

- (1) GEMTIP 模型通过将岩矿石的岩石学特性紧密联系起来，正演结果异常分布明显，为多相复合岩、矿石的资料解释提供了一种新的定量分析方法。
- (2) 利用井地、地井观测方式进行地下介质复电阻率的探测，可知垂向上分辨率能力较水平向的高，

表 3 低阻极化块模型 GEMTIP 参数
Table 3 GEMTIP parameters of low resistivity polarization block model

参数	低阻围岩 ρ_{f_1}	高阻异常体 ρ_{f_2}
$\rho_0 / \Omega m$	100	10
$f_1 / \%$	5	10
$f_2 / \%$	-	40
C_1	0.5	0.8
C_2	-	0.5
$\rho_1 / \Omega m$	0.008	0.1
$\rho_2 / \Omega m$	-	0.008
a_1 / mm	1	0.4
a_2 / mm	-	1
$\alpha_1 / (\Omega \cdot m^2 \cdot s^{-2})$	0.5	0.4
$\alpha_2 / (\Omega \cdot m^2 \cdot s^{-2})$	-	0.5

表 4 高低阻组合极化块模型参数
Table 4 Parameters of high and low resistivity polarization block combined model

	$\rho_0 / \Omega m$	$f_1 / \%$	C_1	$\rho_1 / \Omega m$	a_1 / mm	$\alpha_1 / (\Omega \cdot m^2 \cdot s^{-2})$
ρ_{f_1}	10	15	0.4	0.5	1	0.8
ρ_{f_2}	100	3	0.5	0.1	0.4	0.6

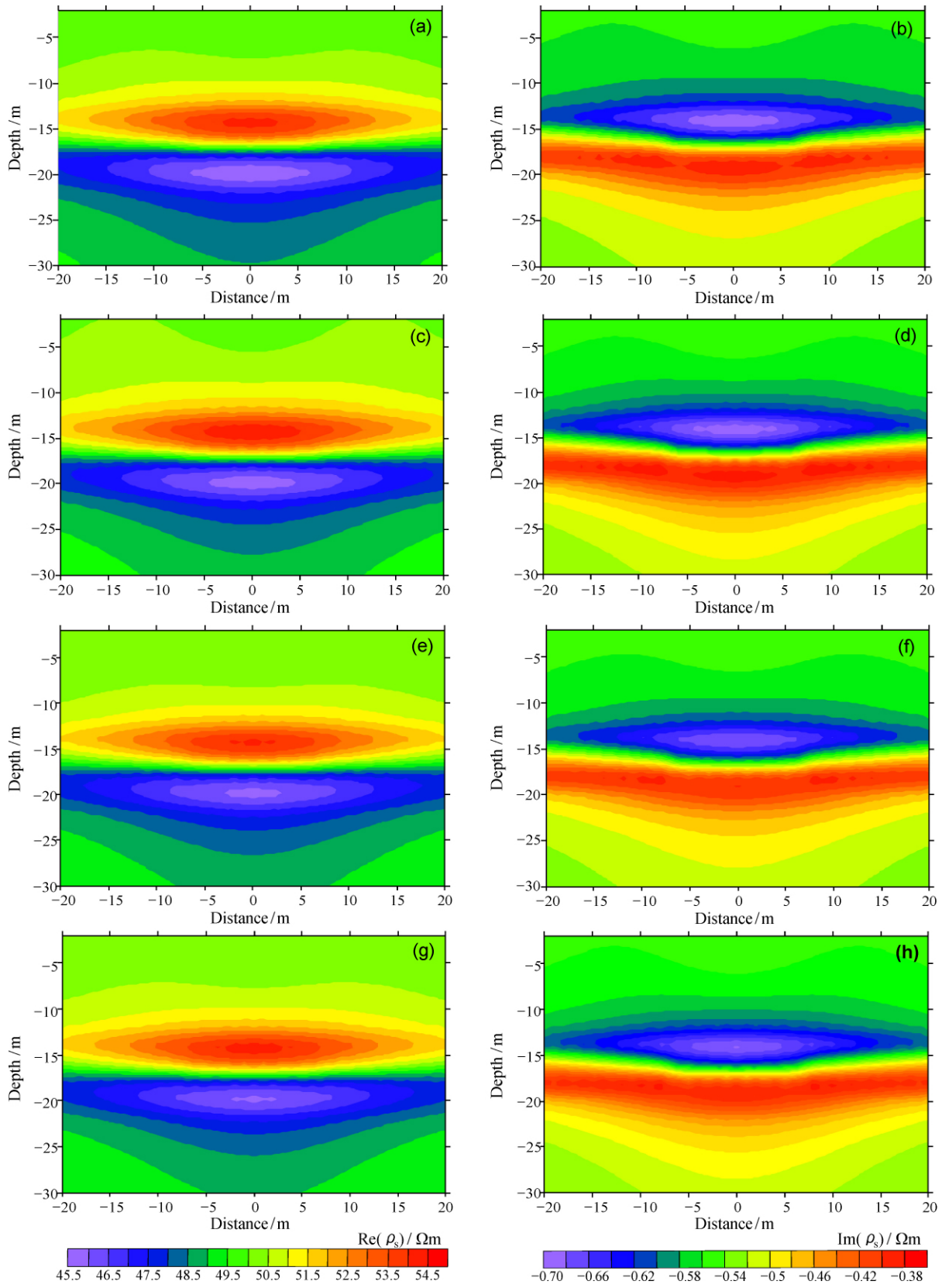


图5 不同频率下的视复电阻率实部(左列)与虚部(右列)等值线图

Fig.5 Contour maps of real component of apparent complex resistivity(left column) and imaginary component of apparent complex resistivity(right column) in different frequencies

(a) 、 (b) 1 Hz; (c) 、 (d) 0.5 Hz; (e) 、 (f) 0.25 Hz; (g) 、 (h) 0.125 Hz

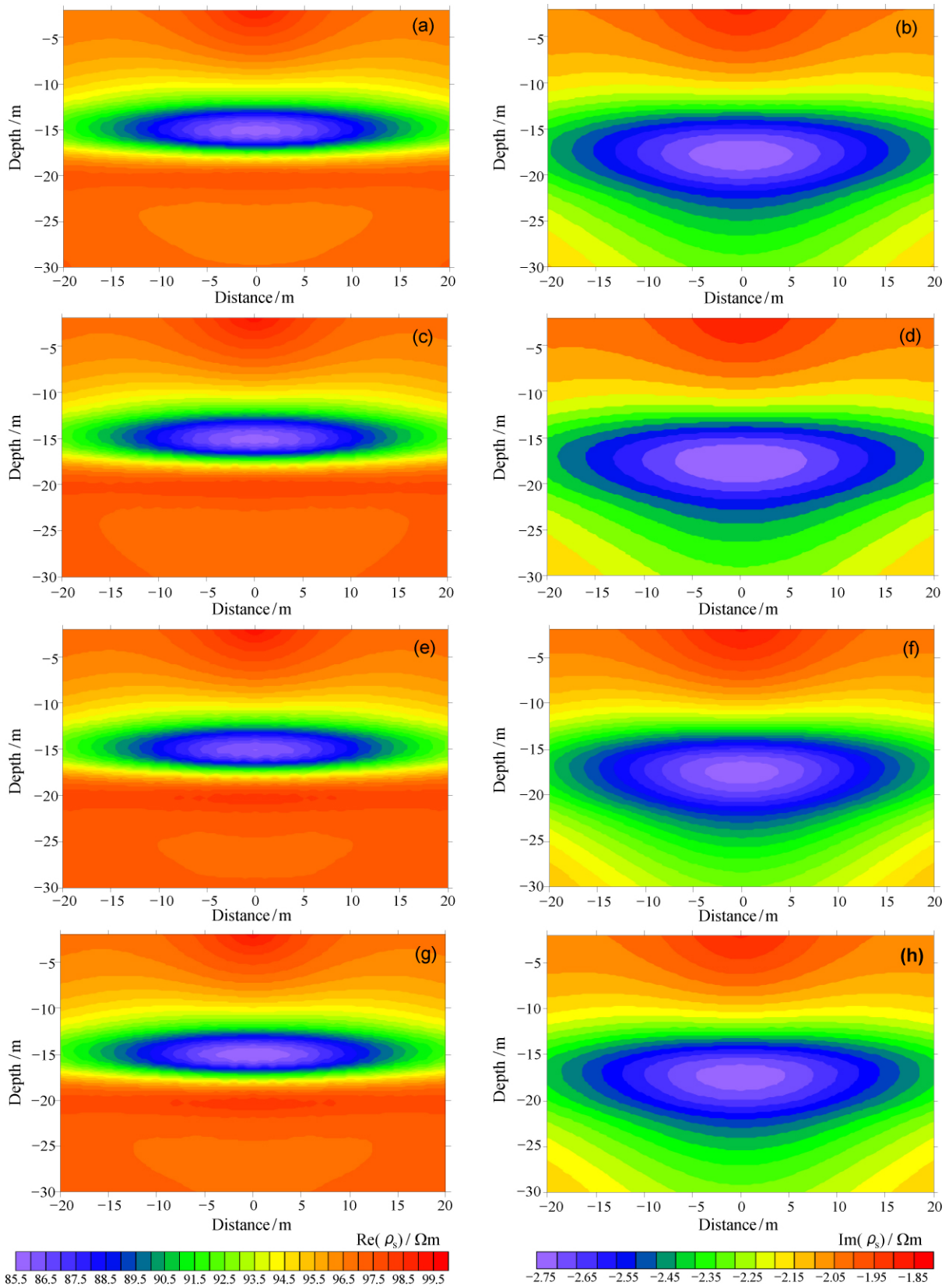


图 6 给定频率的视复电阻率实部(左列)与虚部(右列)等值线图

Fig. 6 Contour maps of real component of apparent complex resistivity(left column) and imaginary component of apparent complex resistivity(right column) in different frequencies

(a) 、 (b) 1 Hz; (c) 、 (d) 0.5 Hz; (e) 、 (f) 0.25 Hz; (g) 、 (h) 0.125 Hz

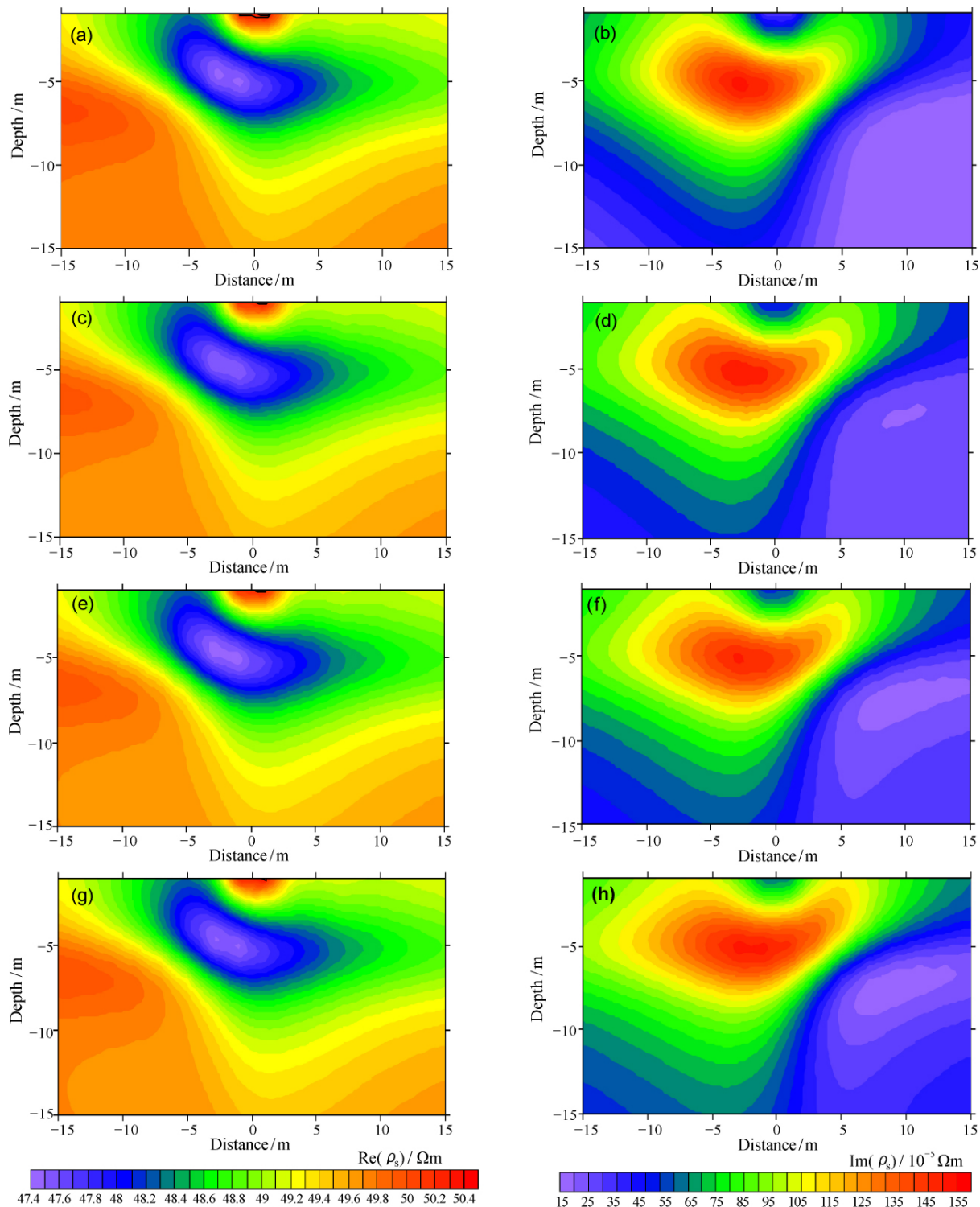


图8 不同频率下的视复电阻率振幅(左列)与相位(右列)等值线图

Fig. 8 Contour maps of amplitude of apparent complex resistivity(left column) and phase of apparent complex resistivity(right column) in different frequencies

(a) 、(b) 1 Hz; (c) 、(d) 0.5 Hz; (e) 、(f) 0.25 Hz; (g) 、(h) 0.125 Hz

且视复电阻率的虚部或相位受频率变化影响较大。(3) 该探测方法能够精确地确定异常体上边界、下边界的埋深位置,为井地、地井高精度反演和解释

研究奠定了坚实的基础。(4) 广义等效介质激电(GEMTIP)模型是CR模型的广义表述,本文是在忽略电磁耦合的情况下进行研究,而在实际测量中

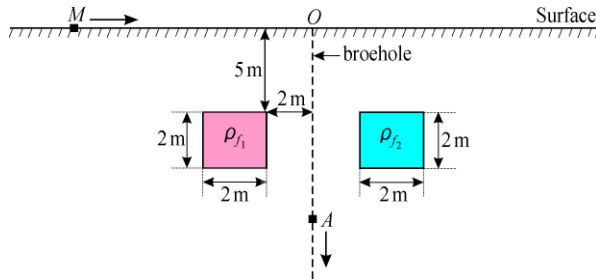


图 7 高阻极化块与低阻极化块组合模型

Fig. 7 Combined model of high and low resistivity polarization block

该耦合情况不能忽略,因此,研究电磁耦合情况下的(GEMTIP)模型响应特征具有一定的实际意义,是下一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 蔡伯林. 金属矿床钻孔地球物理勘探 [M]. 北京: 地质出版社, 1981.
- [2] Pelton W H, Ward S H, Hallof P G, et al. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP [J]. *Geophysics*, 1978, 43 (3): 588 - 609.
- [3] Yuval, Oldenburg D W. Computation of Cole-Cole parameters from IP data [J]. *Geophysics*, 1997, 62 (2): 436 - 448.
- [4] 张桂青, 罗延钟, 崔先文. 由视谱直接反演真谱参数的实用方法 [J]. *地球科学*, 1991, 16 (2): 229 - 239.
- [5] 苏朱刘, 吴信全, 胡文宝 等. 复视电阻率(CR)法在油气预测中的应用[J]. *石油地球物理勘探* 2005 40(4): 467 - 471.
- [6] 陈蜀雁, 刘永明. 双频激电法在阿勒泰山区快速找矿评价中的应用 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2006, 37 (3): 588 - 592.
- [7] 肖占山 徐世浙 罗延钟 等. 岩石复电阻率频散特性的机理研究[J]. *浙江大学学报(理学版)* 2006, 33(5): 584 - 587.
- [8] 肖占山, 徐世浙, 罗延钟, 等. 复电阻率测井的数值模拟研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(3): 343 - 347.
- [9] 戴前伟, 陈德鹏, 刘海飞 等. 双频激电井地电位技术研究剩余油分布[J]. *地球物理学进展* 2009 24(3): 959 - 964.
- [10] 蓝常斌, 罗润林, 王兆龙 等. 时域激电数据的 Cole - Cole 模型参数反演与应用 [J]. *桂林理工大学学报*, 2012, 32 (2): 184 - 188.
- [11] 胡英才, 李桐林, 范翠松, 等. 安徽铜陵舒家店铜矿的电磁法试验研究[J]. *地质学报*, 2014, 88(4): 612 - 619.
- [12] Burtman V Zhdanov M S. Induced polarization effect in reservoir rocks and its modeling based on generalized effective-medium theory [J]. *Resource-Efficient Technologies* 2015(1): 34 - 48.
- [13] Dmitriev V I, Zhdanov M S, Gribenko A, et al. Anisotropy of induced polarization in the context of the generalized effective-medium theory [C]//Society of Exploration Geophysicists, 2008: 677 - 681.
- [14] Zhdanov M S. Generalized effective-medium theory of induced polarization [J]. *Geophysics*, 2008, 73(5): F197 - F211.
- [15] Revil A, Florsch N. Determination of permeability from spectral induced polarization data in granular media [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 181: 1480 - 1498.
- [16] Revil A, Atekwana E, Zhang C, et al. A new model for the spectral induced polarization signature of bacterial growth in porous media [J]. *Water Resources Research* 2012 48: W09545.
- [17] 刘云龙, 熊彬, 罗天涯, 等. 基于广义等效 CR 模型的激电法 2.5 维响应特征研究 [J]. *地球物理学进展*, 2015, 30 (3): 1337 - 1344.
- [18] 刘云龙, 熊彬, 黄业中. 地一井、井一地 IP 有限体积 2.5 维异常响应分析 [J]. *工程地球物理学报*, 2014, 11 (5): 643 - 649.
- [19] 李人宪. 有限体积法基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [20] 徐世浙. 地球物理中的有限单元法 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [21] Tang J T, Wang F Y, Xiao X, et al. 2.5-D DC resistivity modeling considering flexibility and accuracy [J]. *Journal of Earth Science*, 2011, 22 (1): 124 - 130.

2.5-D abnormal response characteristics analysis of surface-to-broehole and broehole-to-surface IP method based on generalized effective CR model

WU Yan-qiang¹, XIONG Bin¹, ZHAO Jian-guo², LUO Tian-ya¹, GUO Sheng-nan¹, LI Chang-wei¹,
DING Yan-hi¹, LI Jing-he¹, CHEN Xin¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: When electromagnetic effects ignored at low frequencies, this paper achieves 2.5-dimensional surface-to-broehole, broehole-to-surface complex finite volume resistivity based on induced polarization (GEMTIP) model of generalized effective medium in frequency domain. Firstly, according to the boundary value satisfied by surface-to-broehole and broehole-to-surface we introduce GEMTIP to geoelectric model and derive the discrete equations of finite volume, by utilizing preprocess iterative algorithm to solve the large and sparse linear equations. Comparisons numerical solution with analytical solution of two-phase layers show the validity of this algorithm. Finally, several multiphase models can test approach. Calculated field values are obviously distributed within a certain frequency bands. The results indicate that surface-to-broehole and broehole-to-surface devices are effective for detecting the abnormal body based on GEMTIP model and provide more new ideas for induced polarization measurements of wells.

Key words: surface-to-broehole; broehole-to-surface; complex resistivity; GEMTIP model; finite volume method