

文章编号: 1001-1986(2010)02-0050-04

# 直流电阻率法的深部结构分辨

## —— 三维模型的二维反演

游秀珍, 吴小平, 王 威, 余 勇, 鲁晶津

(中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 利用三维有限差分方法进行深部三维结构的电阻率三维数值模拟, 对计算得到的单极-单极和对称四极装置视电阻率剖面进行电阻率二维反演研究。结果显示: 单极-单极装置在横向上只要三维异常体中心的水平间距不小于两者中心埋深之和, 就可以基本将 2 个三维结构分辨出来; 相同情况下, 对称四极装置在横向上的分辨效果优于单极-单极装置; 单极-单极装置在垂向上的分辨要优于对称四极装置。

**关 键 词:** 电阻率; 深部三维结构; 二维反演; 分辨能力

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.02.013

## Resolution of deep structures for DC resistivity method: 2D inversion for 3D model

YOU Xiuzhen, WU Xiaoping, WANG Wei, YU Yong, LU Jingjin

(School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Numerical simulation for 3D model with deep structures was carried out by using 3D finite difference resistivity modeling method. 2D inversion of calculated apparent resistivity profiles of pole-pole and symmetric four-pole sounding was studied. The result indicates that pole-pole system can resolve 3D structures if the horizontal interval of the center of 3D abnormal bodies is not less than the total depth of the center of the two structures. Under the same conditions, symmetric four-pole system has horizontal resolution better than pole-pole system, and pole-pole system has vertical resolution better than symmetric four-pole system.

**Key words:** resistivity; 3D deep structures; 2D resistivity inversion; resolution

有限差分法计算简单快速, 且能模拟任意复杂的三维介质模型, 在电阻率三维数值模拟中有许多应用, 国内外均有不少研究成果<sup>[1-4]</sup>, 为研究复杂三维地电模型的电阻率异常及其反演解释奠定了很好的基础。不过, 复杂结构的电阻率三维反演, 由于计算量非常大以及巨大的计算机内存需求等困难, 目前野外实际工作中仍多采用二维反演解释<sup>[5-8]</sup>。由于实际地下多表现为三维复杂结构, 因此用二维反演近似解释三维电阻率数据有良好的实用价值。这方面, 熊彬等<sup>[9]</sup>进行过相关研究, 但仅考虑浅部的三维结构。进入 21 世纪以来, 深部矿(400~500 m)已成为我国矿产勘查的重要对象<sup>[10]</sup>。然而, 深部矿相对浅部矿具有埋深大、矿化信息弱的特点, 使传统勘查技术方法应用的有效性受到较大影响, 造成深部矿勘查的难度加大。本文对深部三维结构的电阻

率三维数值模拟获得的单极-单极和对称四极装置视电阻率剖面进行电阻率二维反演研究, 以探讨直流电阻率法对地下深部同时存在多个三维异常体的分辨能力, 可为减少深部矿勘查的盲目性和风险性提供必要依据, 对现阶段的深部找矿有实际意义。

### 1 电阻率三维有限差分数值模拟<sup>[1-4]</sup>

设位于 $(x_0, y_0, z_0)$ 点处的点电源电流强度为  $I$ , 其产生的点源三维地电场电位  $\varphi(x, y, z)$  满足偏微方程

$$\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = -I \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0), \quad (1)$$

其边界条件为:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0, \text{ 地面 } z = 0;$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} + \frac{\cos \theta}{r} \varphi = 0, \text{ 其他边界。}$$

收稿日期: 2009-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(40874034; 40674037)

作者简介: 游秀珍(1984—), 女, 福建莆田人, 硕士研究生, 从事电磁勘探三维数值模拟研究。

其中  $\sigma(x, y, z)$  是地下介质的电导率;  $n$  是边界外法线方向的座标变量;  $\theta$  是  $n$  和  $r$  的夹角;  $n$  为边界外法线方向的单位矢量;  $r$  为源点到边界上点的向径。

对整个研究区域进行  $N_x \times N_y \times N_z$  的三维网格剖分, 用有限差分数值计算方法求解上述边值问题, 最后形成大型稀疏线性方程组:

$$A\phi = s. \quad (2)$$

其中  $A$  是系数矩阵;  $\phi$  是各节点上的电位向量;  $s$  是源向量。

解此方程组得到三维地电场分布。可见, 电阻率三维正演的速度主要取决于求解该大型线性方程组的效率。

吴小平<sup>[2]</sup>利用不完全 Cholesky 共轭梯度(ICCG)方法, 结合矩阵  $A$  的稀疏存储模式, 大大提高了电阻率三维有限差正演计算得速度, 计算机内存需求也大为减少。

## 2 三维数据的二维反演<sup>[5,11]</sup>

通过电阻率三维数值模拟获得地下三维结构的单极-单极和对称四极装置的视电阻率剖面, 应用目前较通用的二维反演软件 RES2DINV<sup>[11]</sup>, 进行三维模型的二维反演。从以下 2 个模型分别探讨深部三维结构在横向和纵向上的分辨力。

### 2.1 模型一

水平并排三维模型如图 1, 围岩电阻率  $\rho = 200 \Omega \cdot \text{m}$ , 2 个三维不均匀体电阻率分别为  $\rho_1$  和  $\rho_2$ , 截面为  $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ ,  $y$  方向走向长度为  $400 \text{ m}$ 。顶部埋深为  $h$ , 相邻的侧面间距为  $d$ 。

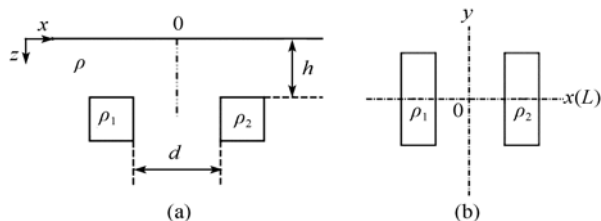


图 1 模型一示意图

Fig. 1 Sketch of model  
a—xz 断面示意图; b—xy 平面示意图

图 2、图 3 分别是 2 低阻( $\rho_1 = \rho_2 = 10 \Omega \cdot \text{m}$ )、2 高阻( $\rho_1 = \rho_2 = 5000 \Omega \cdot \text{m}$ )在不同顶部埋深  $h$  和水平间距  $d$  的情况下, 单极-单极视电阻率二维反演的结果。图 4 是低高阻并存( $\rho_1 = 10 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_2 = 5000 \Omega \cdot \text{m}$ )时的分辨效果。当  $h = 400 \text{ m}$ 、 $d = 400 \text{ m}$  时相邻的 2 低阻三维结构和 2 高阻三维结构都很难分辨, 而低高阻三维并存结构可清楚地分辨出来; 当  $h = 400 \text{ m}$ 、 $d = 600 \text{ m}$  和  $h = 500 \text{ m}$ 、 $d = 1000 \text{ m}$  时, 2 低阻三维结

构和 2 高阻三维结构基本都可分辨。其中二维反演方法对 2 高阻三维结构的分辨能力优于对相同情况下 2 低阻三维结构的分辨能力。可见, 对于 2 并排三维结构电性差异不大时, 在一定的深度范围内, 只要 2 三维结构中心间距不小于其中心埋深之和, 就可以基本将两者分辨出来; 而低高阻三维结构并存情况下, 电性差异比较大则易于分辨。另外, 反演图中能分辨的异常, 其中心横向位置与实际模型相吻合, 纵向位置出现往上偏移的现象, 电阻率绝对值与真实模型相比也有较大偏差, 这些都是随着深度加大分辨率快速下降的反映。图 5 是对称四极装置在不同情况下的二维反演结果, 2 低阻、2 高阻和低高阻三维结构在  $h = 400 \text{ m}$ 、 $d = 400 \text{ m}$  时均可清楚地分辨出来, 表明对称四极比单极-单极装置有更好的三维结构分辨能力, 与理论上梯度测量较电位测量有更好的分辨力相符。

### 2.2 模型二

垂直叠置三维结构地电模型如图 6 所示。上、下三维结构截面大小分别为  $200 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  和  $400 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ ,  $y$  方向走向长度均为  $400 \text{ m}$ ; 上方三维结构的上界面埋深为  $h$ , 其底面与下方三维结构的顶界

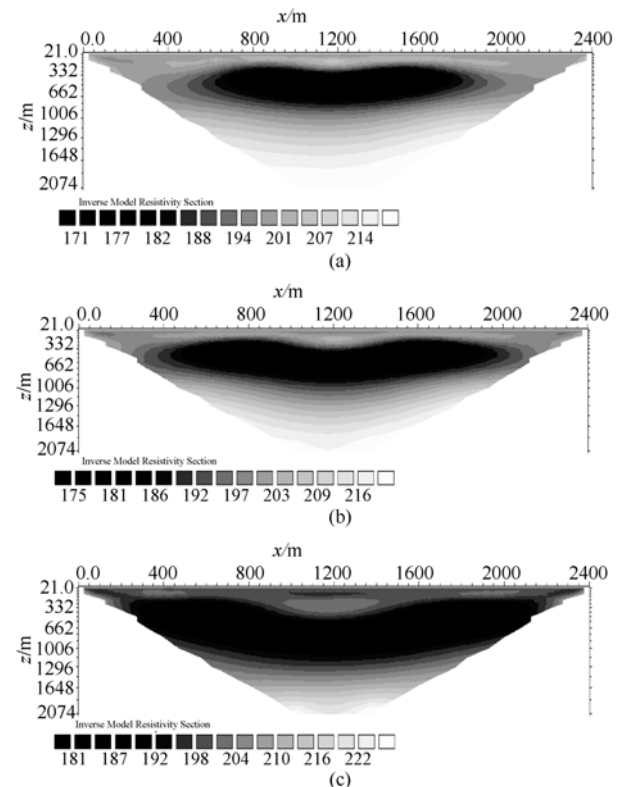


图 2 2 低阻三维结构的单极-单极视电阻率二维反演结果

Fig. 2 2D inversion of pole-pole apparent resistivity in 2 low resistant 3D structure

a— $h = 400 \text{ m}$ ,  $d = 400 \text{ m}$ ; b— $h = 400 \text{ m}$ ,  $d = 600 \text{ m}$ ;

c— $h = 500 \text{ m}$ ,  $d = 1000 \text{ m}$

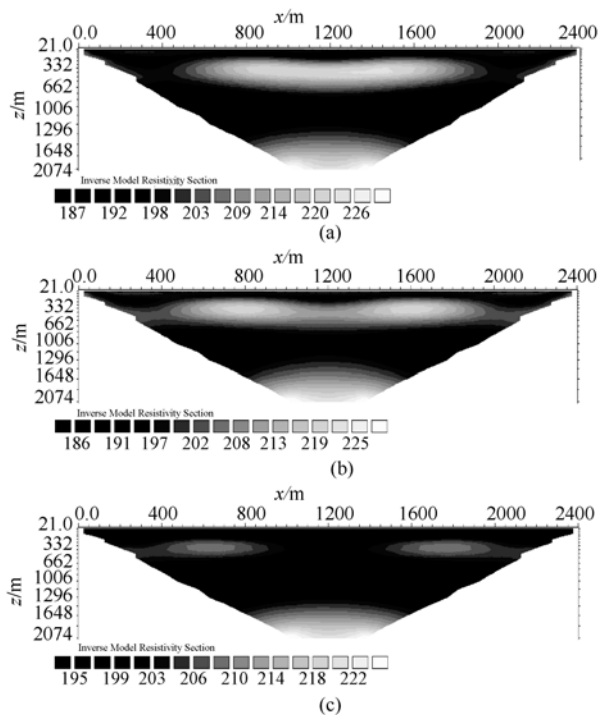


图 3 2 高阻三维结构的单极-单极视电阻率二维反演结果

Fig. 3 2D inversion of pole-pole apparent resistivity in 2 high resistant 3D structure  
a—400 m,  $d=400$  m; b— $h=400$  m,  $d=600$  m;  
c— $h=500$  m,  $d=1000$  m

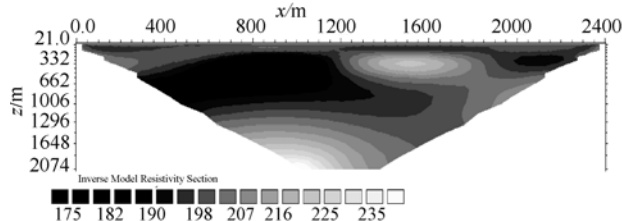
图 4 低高阻并存三维结构的单极-单极视电阻率二维反演结果( $h=400$  m,  $d=400$  m)

Fig. 4 2D inversion of pole-pole apparent resistivity in low and high resistant 3D structure

面相距  $d$ ; 上下电阻率分别为  $\rho_1$  和  $\rho_2$ , 围岩电阻率为  $\rho=200 \Omega \cdot \text{m}$ 。

单极-单极和对称四极装置视电阻率对模型中上下都为低阻( $\rho_1=\rho_2=10 \Omega \cdot \text{m}$ )、都为高阻( $\rho_1=\rho_2=5000 \Omega \cdot \text{m}$ )、上低阻下高阻( $\rho_1=10 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_2=5000 \Omega \cdot \text{m}$ )、上高阻下低阻( $\rho_1=5000 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_2=10 \Omega \cdot \text{m}$ )时的分辨效果见图 7 和图 8。图 7 为该模型单极-单极装置在各种情况下视电阻率的二维反演结果。当上下都为低阻时, 反演结果只对上方的低阻结构有反映, 下方的低阻结构基本没有迹象, 反而呈现出假高阻圈晕; 当上下都为高阻时, 也只反映出上方的高阻结构, 对下方的高阻结构没有反映; 上低阻下高阻结构的反演结果有很好地分辨, 但由于与上下都为低阻时的反演结果相似, 需注意分辨真假异常; 上高阻下低阻时,

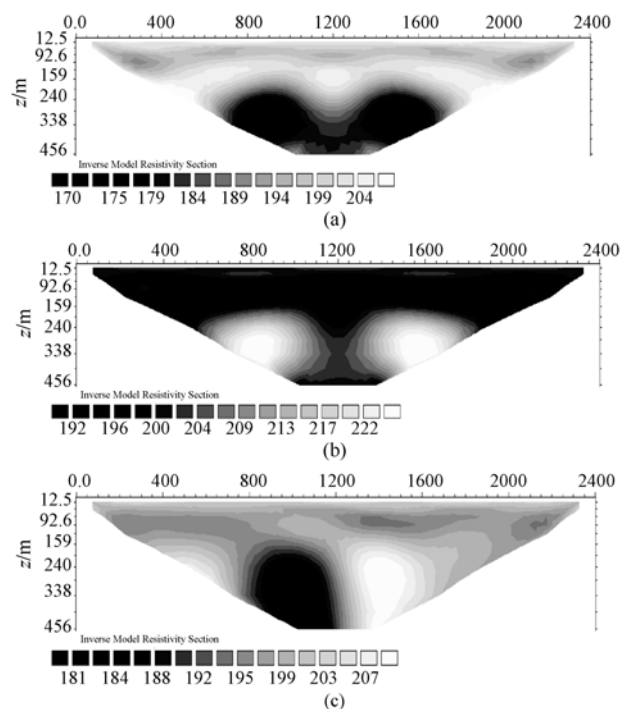
图 5 对称四极装置视电阻率的二维反演结果( $h=400$  m,  $d=400$  m)

Fig. 5 2D inversion of apparent resistivity of Wenner arrangement( $h=400$  m,  $d=400$  m)  
a—2 低阻; b—2 高阻; c—低高阻

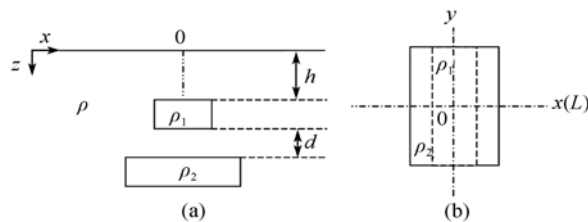


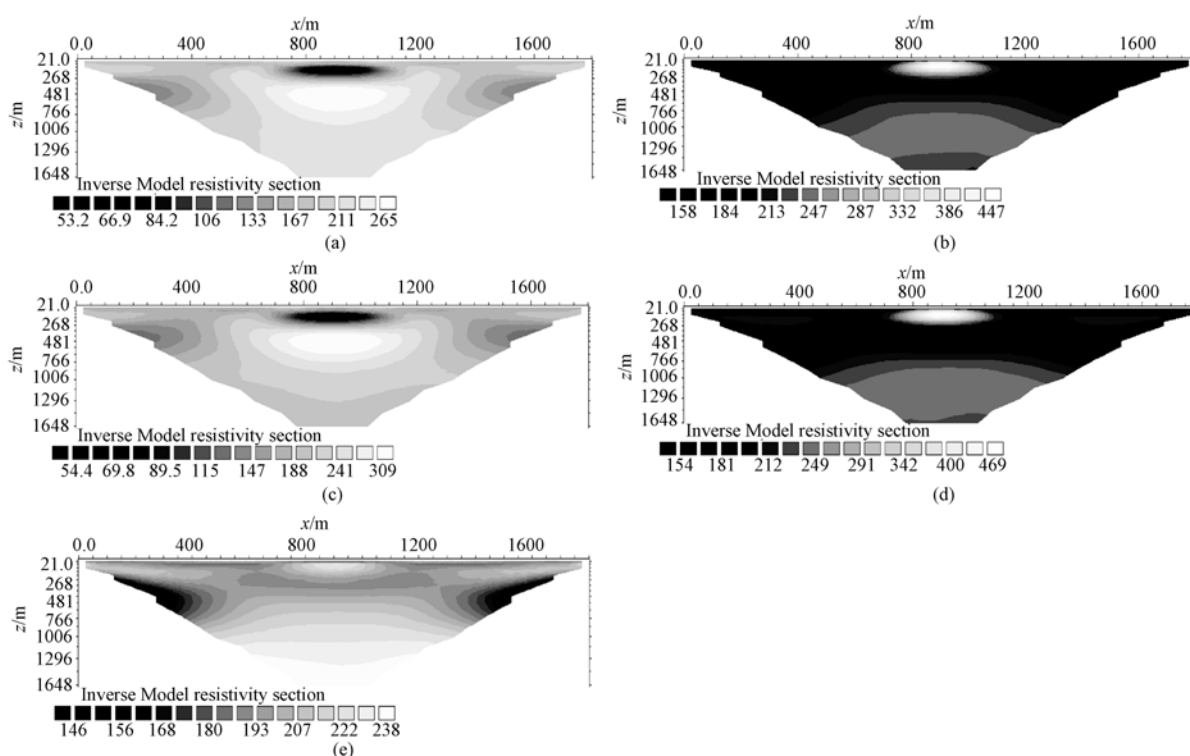
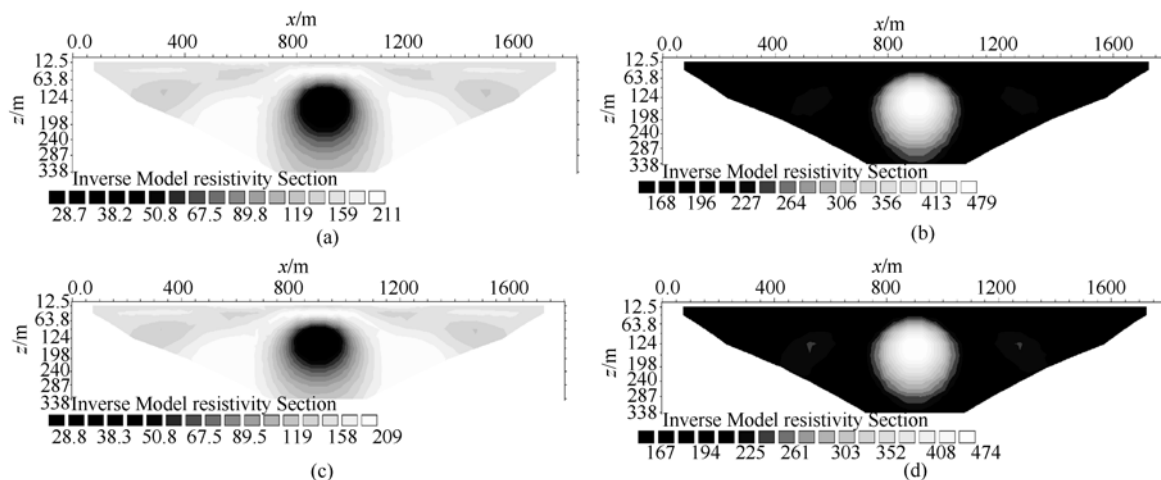
图 6 模型二示意图

Fig. 6 Sketch of model 2

a— $xz$  断面示意图; b— $xy$  平面示意图

也能较好地分辨出高阻异常和低阻异常, 但随埋深增大(图 7e), 高阻异常下方的低阻异常变得模糊, 分辨力明显减弱。图 8 为对称四极装置在各种情况下视电阻率剖面的二维反演结果, 无论是上下都为低阻或高阻、上低阻下高阻或上高阻下低阻, 二维反演对异常体的分辨均不太好。

总体看, 除异常体电性差异较大(如上低阻下高阻或上高阻下低阻)的单极-单极装置能够有所分辨外, 电阻率法在垂向上的分辨均不太好。实际上, 电阻率法在垂向上的分辨减弱本在预料中, 但衰减这样严重是值得在实际解释中关注的问题。另一有意义的结果是, 单极-单极装置在垂向上的分辨要优于对称四极装置, 这可以从两个方面说明: 其一, 在电极数相同的情况下, 对称四极装置探测深度比单极-单极装置浅, 可能使得深部信息未能很好地反映

图 7 单极-单极装置视电阻率的二维反演结果( $h=100$  m,  $d=300$  m)Fig. 7 2D inversion of pole-pole apparent resistivity( $h=100$  m,  $d=300$  m)a——上下低阻; b——上下高阻; c——上低阻下高阻; d——上高阻下低阻; e——上高阻下低阻  $h=200$  m,  $d=100$  m 时的反演结果图 8 对称四极装置视电阻率的二维反演结果( $h=100$  m,  $d=300$  m)Fig. 8 2D inversion of apparent resistivity of Wenner arrangement( $h=100$  m,  $d=300$  m)

a——上下低阻; b——上下高阻; c——上低阻下高阻; d——上高阻下低阻

出来; 其二, 由于对称四极的梯度测量利用的是水平梯度, 因而在横向上的分辨有明显的优势, 但在垂向上则丧失了这种优势。

### 3 结论

a. 单极-单极装置在横向上只要三维异常体中心的水平间距不小于两者中心埋深之和, 就可以基本将 2 个三维结构分辨出来; 在垂向上三维结构的分辨力不高, 仅对上低阻下高阻或上高阻下低阻这

种异常体电性差异大的情况能够有所分辨。

b. 相同情况下, 对称四极装置在横向上的分辨效果优于单极-单极装置, 因为理论上梯度测量较电位测量有更好的分辨力, 但垂向上的分辨更弱。

c. 电阻率法在垂向上的分辨迅速减弱, 不过单极-单极装置在垂向上的分辨要优于对称四极装置, 可能是因为单极-单极装置有更深的探测深度, 同时由于对称四极的梯度测量利用的是水平梯度, 因而

(下转第 58 页)