第 36 卷第 3 期
2012 年 6 月

物 探 与 化 探
GEOPHYSICAL & GEOCHEMICAL EXPLORATION

Vol. 36, No. 3
Jun. ,2012

井—地三维激发极化数据快速反演

吕玉增[1,2], 阮百尧[2], 彭苏萍[1]

(1. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 为实现井—地激发极化数据的快速反演, 分析三维有限元正演四面体网格剖分形成的系数矩阵的元素规律, 应用 MSR 非零元素压缩存储和 SSOR-PCG 方程求解技术, 提高了正演执行效率。在正演基础上, 利用 Jacobian 矩阵与正演方程的简单关系, 采用共轭梯度法求解最小二乘目标函数的模型修改量, 避开 Jacobian 矩阵的直接计算和存储, 实现了三维井-地激电数据的分钟级快速反演。模型正演合成数据的反演结果表明, 能基本再现已知的模型。

关键词: 井—地激电; 激发极化法; 最小二乘快速反演

中图分类号: P631　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-8918(2012)03-0473-06

井-地激发极化法(简称井-地激电)是指井中供电, 地面观测的一种电法勘探方法, 由于其供电点位于地下, 更靠近目标体, 而在地面观测, 观测方式灵活、数据采集方便, 所以在石油、矿产勘探等领域广泛应用[1-4]。然而, 井-地激电受供电点位置影响大, 在供电点对应的地面附近, 异常容易出现畸变且特征复杂, 定性解释难度大, 迫切需要三维定量反演解释技术。反演计算速度是决定三维反演方法实用性的关键因素之一。针对井—地三维有限元法正演算法, 分析系数矩阵的元素规律, 采用系数矩阵的 MSR 非零元素压缩存储和 SSOR-PCG 方程求解技术, 实现了快速正演。三维反演中, 利用 Jacobian 矩阵 $\boldsymbol{A}$ 与正演方程的简单关系, 避开 $\boldsymbol{A}$ 的直接计算和存储, 而仅计算 $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}})$ 与向量的乘积等, 应用共轭梯度迭代技术(CG)实现三维井—地激电数据的分钟级的最小二乘快速反演。

1 最小二乘约束反演

1.1 目标函数

将视电阻率数据反演问题线性化, 并加入光滑约束和已知信息, 构造最小二乘反演目标函数[9]

$$\Psi_p = \| \boldsymbol{W}_d(\Delta \boldsymbol{d} - \boldsymbol{A}\Delta \boldsymbol{m}) \|^2 + \| \boldsymbol{W}_m(\boldsymbol{m} - \boldsymbol{m}_0 + \Delta \boldsymbol{m}) \|^2 , \tag{1}$$

式(1)右端第一项为常规的最小二乘项, 第二项为已知先验信息项, 其中, $\Delta \boldsymbol{d}$ 为数据残差矢量; $\boldsymbol{m}$ 为预测模型向量; $\boldsymbol{m}_0$ 为已知模型向量; $\boldsymbol{A}$ 为偏导数矩阵; $\boldsymbol{W}_d$ 为观测数据拟方差矩阵, $\boldsymbol{W}_m$ 为模型加权矩阵。

对目标函数式(1)中的 $\Delta \boldsymbol{m}$ 求导, 并令其等于零, 利用 $\boldsymbol{W}_d$、$\boldsymbol{W}_m$ 的对称性, 得到线性方程组

$$(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d\boldsymbol{A} + \boldsymbol{W}_m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_m)\Delta \boldsymbol{m} = \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d\Delta \boldsymbol{d} + \boldsymbol{W}_m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_m(\boldsymbol{m}_0 - \boldsymbol{m}) , \tag{2}$$

写成迭代形式

$$\boldsymbol{m}_{j+1} = \boldsymbol{m}_j + \Delta \boldsymbol{m} = \boldsymbol{m}_j + (\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d\boldsymbol{A} + \boldsymbol{W}_m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_m)^{-1} \cdot [\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d\Delta \boldsymbol{d} + \boldsymbol{W}_m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_m(\boldsymbol{m}_0 - \boldsymbol{m})] 。 \tag{3}$$

视极化率数据反演目标函数:

$$\Psi_\eta = \| \boldsymbol{W}_d(\boldsymbol{\eta}_a - \boldsymbol{A}\boldsymbol{\eta}) \|^2 + \| \boldsymbol{W}_m(\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}_0) \|^2 , \tag{4}$$

$\boldsymbol{\eta}_a$ 为视极化率数据向量; $\boldsymbol{\eta}$ 为预测模型向量; $\boldsymbol{\eta}_0$ 为已知模型向量, 其他参数与式(1)相同。对 $\boldsymbol{\eta}$ 求导并令其等于零, 得到方程组形式

$$(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d\boldsymbol{A} + \boldsymbol{W}_m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_m)\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_d\boldsymbol{\eta}_a + \boldsymbol{W}_m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_m\boldsymbol{\eta}_0 。 \tag{5}$$

由于 $\boldsymbol{A}$ 已经在电阻率反演中得到, 因此只需很小的工作量即可完成极化率反演。

1.2 CG 迭代算法

常规求解式(1)反演问题, 要先计算 Jacobian 矩阵 $\boldsymbol{A}$, 然后计算模型参数的改正项 $\Delta \boldsymbol{m}$, 不断修正

收稿日期: 2011-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(40774057)、全国危机矿山接替找矿项目新技术新方法示范项目(200799086)、广西自然科学基金(桂科自 0832263)、广西地质工程中心重点实验室项目(桂科能 07109011-K009)、桂林理工大学科研启动基金项目

模型,直到模型参数符合给定的精度。对于井—地激电数据的反演而言,若有 p 个供电点,每个供电点有 n 个观测数据,反演区域有 m 个网格单元,A 是所有观测数据对各个网格参数求导,那么 A 的大小为 $(p\times m\times n)^2$。对于三维反演而言,反演的网格单元多,直接求取和存储 A 将耗费巨大的计算机资源,几乎无法在 PC 机上完成。Zhang 曾采用共轭梯度(CG)迭代法求解改正项 $\Delta \boldsymbol{m}$,避开 A 的直接求取和存储[5],整个迭代过程仅需要计算乘积 $\boldsymbol{Ax}$ 和 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}$,这样反演效率主要取决于三维正演和 $\boldsymbol{Ax}$ $(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y})$ 的计算。

2 有限元快速正演

2.1 四面体剖分有限元正演

井-地激发极化法点电源场电位满足方程[13]

$$\begin{cases} \nabla\cdot(\sigma\nabla u) = -I\delta(A) & \in\Omega \\ \partial u/\partial n = 0 & \in\Gamma_s \\ \partial u/\partial n + u\cdot\cos(r,n)/r = 0 & \in\Gamma_\infty \end{cases} \tag{6}$$

其中,Γ_s 为区域 Ω 的地面边界,Γ_∞ 为区域 Ω 的地下边界,n 为边界的外法向方向,σ 为介质的电导率,u 为电位。式(6)等价的变分问题为式(7)

$$\begin{cases} F(u) = \iint\limits_{\Omega}\left[\frac{1}{2}\sigma(\nabla u)^2 - I\delta(A)u\right]\mathrm{d}\Omega + \\ \qquad \frac{1}{2}\int\limits_{\Gamma_\infty}\sigma\cdot\cos(r,n)\cdot u^2/r\mathrm{d}\Gamma\ , \\ \delta F(u) = 0\ 。 \end{cases} \tag{7}$$

将积分区域 Ω 剖分成许多四面体单元,并假定单元内电导率 σ 均匀,电位线性变化。式(7)对每个四面体单元进行积分、求和,并扩展成由全体节点组成的矩阵,令其变分为零,得线性方程组[14]

$$\boldsymbol{Ku} = \boldsymbol{p}, \tag{8}$$

$\boldsymbol{u}$ 是全部节点的 u_i 组成的列向量,$\boldsymbol{p}$ 是与点电源项有关。计算中适当选取 Γ_∞ 边界以满足齐次边界条件,而近似忽略式(7)右端第二项无穷远边界积分,这时 $\boldsymbol{K}=\sum\boldsymbol{K}_e$。解方程组(8),得到各节点的电位。

设四面体单元 e 的 4 个角点编号为 1、2、3、4,坐标为 (x_i,y_i,z_i),$i=1,2,3,4$;则有

$$\boldsymbol{K}_e = (k_{ij}) = (k_{ji}) = \frac{\sigma_e}{36V}(a_ia_j + b_ib_j + c_ic_j)\ , \tag{9}$$

$$i = j = 1,2,3,4。$$

其中,V 是四面体单元体积;a_i、b_i、c_i 是与四面体单元顶点坐标有关的常数,具体计算式为

$$V = \frac{1}{6}\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_i & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix},$$

$$a_1 = \begin{vmatrix} y_2 & z_2 & 1 \\ y_3 & z_3 & 1 \\ y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix},\ b_1 = -\begin{vmatrix} x_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix},\ c_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix};$$

$$a_2 = -\begin{vmatrix} y_1 & z_1 & 1 \\ y_3 & z_3 & 1 \\ y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix},\ b_2 = \begin{vmatrix} x_1 & z_1 & 1 \\ x_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix},\ c_2 = -\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix};$$

$$a_3 = \begin{vmatrix} y_1 & z_1 & 1 \\ y_2 & z_2 & 1 \\ y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix},\ b_3 = -\begin{vmatrix} x_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & z_2 & 1 \\ x_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix},\ c_3 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix};$$

$$a_4 = -\begin{vmatrix} y_1 & z_1 & 1 \\ y_2 & z_2 & 1 \\ y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix},\ b_4 = \begin{vmatrix} x_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix},\ c_4 = -\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}。$$

2.2 MSR 矩阵存储和 SSOR-PCG 迭代求解

上面有限元法正演形成的系数矩阵 $\boldsymbol{K}$ 是对称、稀疏矩阵,其中绝大部分元素值为零,但每行零元素的分布和个数不同,与网格剖分和节点编号有关,通常采用变带宽技术存储 $\boldsymbol{K}$。例如,对直角坐标系中网格节点 $(x\times y\times z)=(5\times5\times5)$ 的三维四面体剖

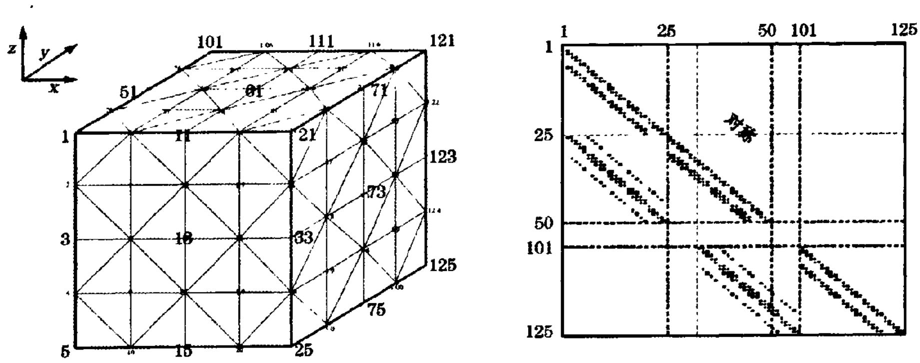

图 1　四面体网格剖分和系数矩阵下三角非零元素分布

分,网格节点个数为 125,四面体单元个数为 320,节点编号遵循 z—x—y 的坐标先后顺序,形成的系数矩阵非零元素分布见图 1 所示,常规变带宽存储这个下三角阵需要 3 225 个元素,而非零元素个数仅有 810 个,可见非零元素存储较变带宽存储可大大节省内存。网格剖分数越多,非零元素存储的优势越明显。

MSR(modified sparse row)是一种改进的行压缩索引存储技术,该方法以行为单位,顺序存储系数矩阵中的非零元素。考虑到在方程组的求解过程中,系数矩阵对角线元素均不为零,且对角线元素的访问和运算最频繁,所以把对角线元素提出来单独存储。该存储方式仅需要两个数组:实型数组 AA 和整型数据 ICOL。

实型数组 AA($M+1$):AA 数组前 N 个元素顺序存储系数矩阵的主对角线元素,第 $N+1$ 个元素为任意值;从第 $N+2$ 元素开始,按行存储除对角线元素之外的其他非零元素。整型数组 ICOL($M+1$):ICOL(1) $=N+2$,从第 2 到第 N 个元素存放系数矩阵的各行第一个非零元素在 AA 中的位置,ICOL($N+1$) $=M+2$;其他元素存放与 AA 数组对应元素在系数矩阵中的列号。上述说明中 M 为非零元素个数,N 为方程的阶数。

分析四面体剖分系数矩阵中非零元素的分布规律,编写了井-地激电三维有限元正演系数矩阵非零元素 MSR 格式存储子程序[14] MSR(NX, NY, NZ, ICOL, K),其中 NX 、NY 和 NZ 分别为直角坐标系下 x、y、z 三个方向网格节点剖分个数,为输入参数;ICOL($M+1$),K $=M+1$ 为输出参数,为实际的非零元素个数。

下面介绍用 SSOR-PCG 迭代法求解方程组(8)的过程。

对称系数矩阵 $\boldsymbol{K}$ 可写为对角阵 $\boldsymbol{D}$ 和严格下三角阵 $\boldsymbol{E}$ 的和形式:$\boldsymbol{K}=\boldsymbol{D}-\boldsymbol{E}-\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{M}$ 为 $\boldsymbol{K}$ 的 SSOR 预条件矩阵,则

$$\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{K}\boldsymbol{u}=\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{p}\ ,$$

$$\boldsymbol{M}=(\boldsymbol{D}-\omega\boldsymbol{E})\boldsymbol{D}^{-1}(\boldsymbol{D}-\omega\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}})\ ,$$

其中,$\omega\in[0,2]$,为松弛因子,通过试算来确定。

初始值 $r_0=p-\boldsymbol{K}x_0$,$z_0=\boldsymbol{M}^{-1}r_0$,$q_0=z_0$,计算

$$\alpha_j=(r_j,z_j)/(\boldsymbol{K}q_j,q_j)$$

$$x_{j+1}=x_j+\alpha_j q_j$$

$$r_{j+1}=r_j-\alpha_j\boldsymbol{K}q_j$$

$$z_{j+1}=\boldsymbol{M}^{-1}r_{j+1}$$

$$\beta_j=(r_{j+1},z_{j+1})/(r_j,z_j)$$

$$q_{j+1}=z_{j+1}+\beta_j q_j,$$

$j=0,1,2,3\cdots$,直至收敛。

由于预条件矩阵 $\boldsymbol{M}$ 与系数矩阵 $\boldsymbol{K}$ 具有相同的稀疏性,同样也采用 MSR 压缩存储,整个迭代过程只是系数矩阵非零元素的运算,计算量小,计算速度快。

3　Jacobian 矩阵计算

在方程(8)两边分别对模型参数求导。方程右端项是电源项,与模型参数无关,得

$$\frac{\partial\boldsymbol{K}}{\partial\boldsymbol{\sigma}}\boldsymbol{u}+\boldsymbol{K}\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial\boldsymbol{\sigma}}=0\ ,$$

即

$$\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial\boldsymbol{\sigma}}=-\boldsymbol{K}^{-1}\frac{\partial\boldsymbol{K}}{\partial\boldsymbol{\sigma}}\boldsymbol{u},\tag{10}$$

Jacobian 矩阵 $\boldsymbol{A}=(\partial\boldsymbol{u}/\partial\boldsymbol{\sigma})$ 与向量 $\boldsymbol{x}$ 的乘积

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=-\boldsymbol{K}^{-1}\frac{\partial\boldsymbol{K}}{\partial\boldsymbol{\sigma}}\boldsymbol{u}\boldsymbol{x}\ ,\tag{11}$$

考虑 $\boldsymbol{K}$ 的对称性,矩阵 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$ 与向量 $\boldsymbol{y}$ 的乘积为

$$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}=-\boldsymbol{K}^{-1}\frac{\partial\boldsymbol{K}}{\partial\boldsymbol{\sigma}}\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}\ 。\tag{12}$$

式(11)、式(12)说明,$\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}$ 和 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}$ 的计算可以转化为类似正演方程求解和矩阵相乘的相关运算,这就避免了 Jacobian 矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的直接计算和存储。分析这两

式右端项$\partial \boldsymbol{K}/\partial \boldsymbol{\sigma}$的计算，式(9)说明$\partial \boldsymbol{K}/\partial \boldsymbol{\sigma}_i$是仅与第$\boldsymbol{i}$单元的4个节点有关，其他元素为零，在正演计算中已经计算出来，只需将其保存即可。

4 反演算例

算例一。模型如图2所示，均匀半空间下方有一个低阻高极化体和一个高阻异常体，$\rho_0=100\ \Omega\cdot$m，$\eta_0=1\%$，$\rho_1=10\ \Omega\cdot$m，$\eta_1=50\%$，$\rho_2=1\ 000\ \Omega\cdot$m，$\eta_2=1\%$；低阻高极化异常体顶部埋深$h_1=7$ m，离钻孔距离$d_1=1$ m，模型大小$a_1\times b_1\times c_1=6$ m $\times 4$ m $\times 2$ m；高阻异常体$h_2=4$ m，$d_2=5$ m，$a_2\times b_2\times c_2=3$ m $\times 4$ m $\times 3$ m；井中供电地面观测，供电点位于钻孔深度$H=10$ m处，地面测线沿x方向布设，观测电极距$MN=1$ m，测点距1 m，相邻测线距1 m。以井口为坐标原点，通过三维有限元正演生成地面9条测线(y为$-4\sim4$ m)共270个视电阻率和视极化率"实测数据"。

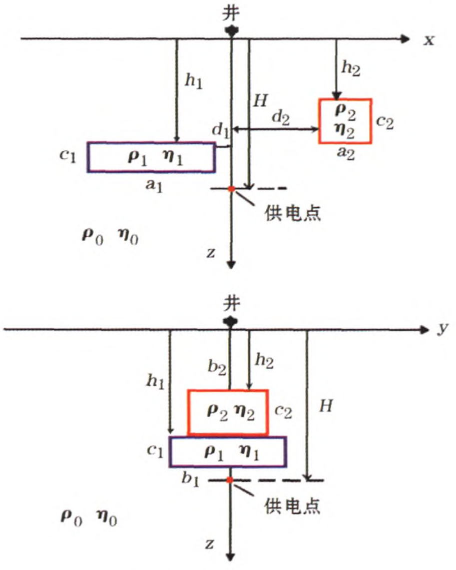

图2 算例一的地电模型

反演初始模型取均值，电阻率为100 Ω·m，极化率为1%。经过5次反演迭代，在计算平台(Dell Workstation PWS650，Intel(R) Xeon(TM) CPU2.8 GHz 2.79 GHz，内存2.00 GB)上耗时约9.3 min (SSOR-PCG迭代30次)，结束电阻率和极化率的反演。

图3给出了2条测线下方电阻率和极化率反演结果。对比已知模型，电阻率的反演结果基本圈定了高、低阻异常体的位置、延伸范围及边界，低阻异常体的反演电阻率数值基本逼近真实值，而高阻体差异较大，在供电点周围，反演出现了一些多余的高阻构造。极化率反演结果较电阻率的反演结果明显要好，基本反映出了异常体形态和边界，在供电点位置周围，极化率反演结果出现负值和小的多余构造。

分析井-地观测方式，客观上观测数据反映井中供电点以上的地电信息更多一些，这是造成供电点上部反演效果明显优于下部的主要原因。由于单点的井中供电地面观测获取的数据信息量少，反演本身的多解性导致了反演出现多余构造。

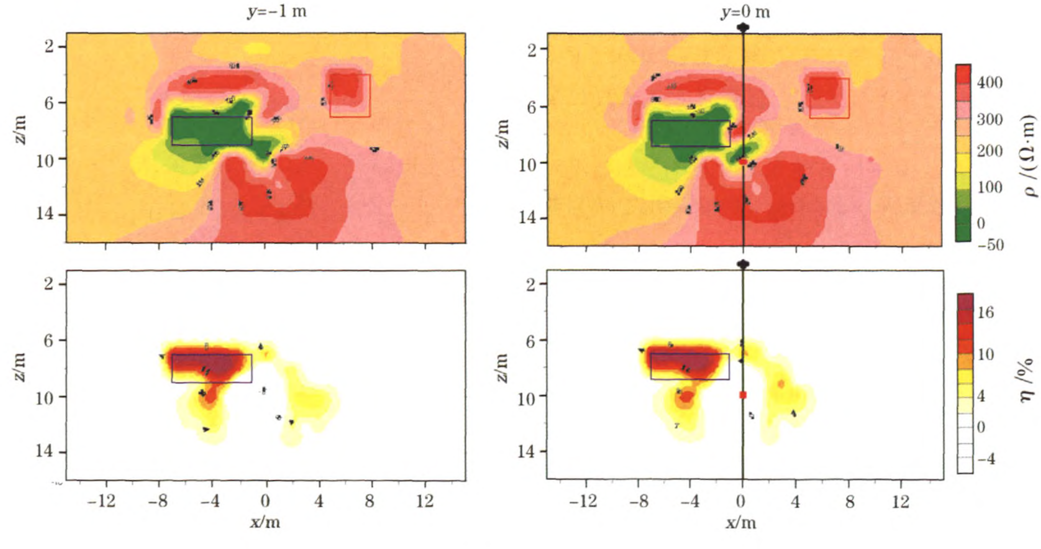

图3 算例一不同测线的电阻率和极化率反演结果

算例二。二维山脊地形(图 4),山脊高 10 m,宽 20 m,两侧坡度 45°,钻孔位于山脊侧坡上。45°倾斜板状异常体位于地形下方偏钻孔一侧,厚度 2 m,x 方向延伸 6 m,y 方向延伸 4 m。背景参数 ρ_0 = 100 Ω · m,η_0 = 1%,异常体参数 ρ_1 = 10 Ω · m,η_1 = 20%。地面测线沿 x 方向布设,测点距 1 m,相邻测线距 1 m,山顶对应坐标零点。

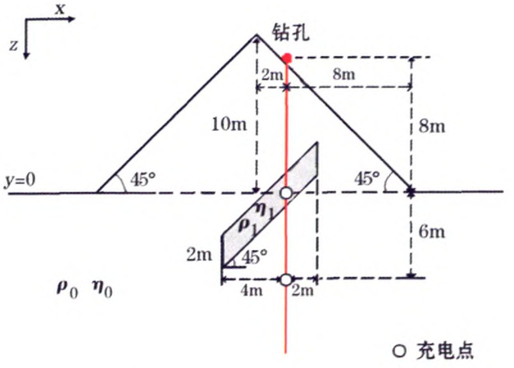

图 4　算例二地电模型及供电点位置示意

钻孔穿过异常体,揭露深度为 7 ~9 m。为了增加数据信息量,在钻孔中布设两个供电点,一个位于钻孔揭露的异常体中心位置上,深度 8 m,另一个位于异常体的下方,深 14 m。在地面布设了 7 条测线(y 为 -3 ~3 m),通过三维有限元正演生成 840 个"实测数据"(其中 420 个一次场电位数据,420 个二次场数据)。

为减少反演的多解性,将钻孔揭露异常体的位置和电性(电阻率和极化率)作为已知模型 m_0 对反演加以约束,经过 6 次 CG 反演迭代,在计算平台上耗时约 11.4 min(SSOR-PCG 迭代 30 次)。图 5 为不同测线上电阻率和极化率的反演结果。电阻率和极化率的反演结果清晰地反映了异常体的位置、倾向和延伸,数值上与已知模型参数值也比较接近。

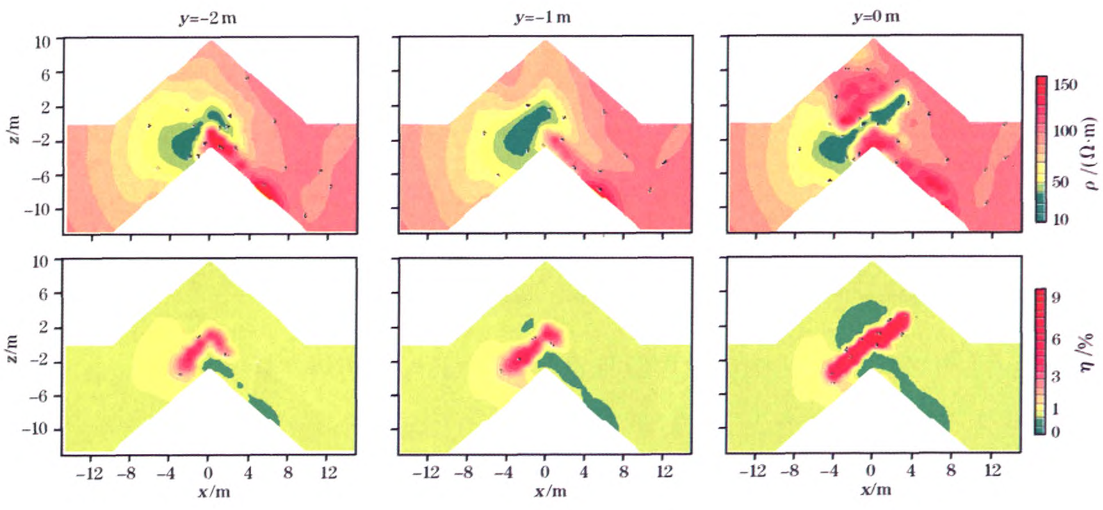

图 5　算例二不同测线的电阻率(上)和极化率(下)反演结果

5　结论

利用 MSR 非零元素存储和 SSOR-PCG 方程求解技术实现了井-地三维激电的快速正演,为实现快速反演奠定了基础。

从模型正演合成数据三维反演结果来看,由于反演本身的多解性等原因,井-地激电反演出现了一些虚假的多余构造,容易引起错误解释,合理利用钻孔资料对反演进行约束可提高反演效果。基于共轭梯度反演耗时约为分钟级,基本实现了井-地激电数据的快速三维反演。

总体上,井-地激电数据的反演对供电点上部区域的反演效果明显好于下部区域,主要是由于井-地观测方式获取的供电点上部区域信息更多一些。因此,在井-地激电实际工作中,应尽可能把供电点至于异常体的下方。另外,必要时可在井中多个位置供电,多次观测,以增加观测数据信息量。

参考文献:

[1]　何展翔. 大功率井-地电法油藏边界预测技术及效果[J]. 石油勘探与开发,2004,31(5):74 -76.

[2]　汤井田,张继锋,冯兵,等. 井地电阻率法歧离率确定高阻油气藏边界[J]. 地球物理学报,2007,50(3):926 -931.

[3] 岳建华,刘志新. 井—地三维电阻率成像技术[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 407-411.

[4] 许新刚,刘志新,王大庆. 矿井电阻率成像技术的现状与展望[J]. 地球物理学进展,2004,19(1):052-055.

[5] Zhang J, Mackie R L, Madden T R. 3D resistivity forward modeling and inversion using conjugate gradients [J]. Geophysics, 1995, 60(5):1313-1325.

[6] Wilkinson P B, Chambers J E, Meldrum P I, et al. Optimization of array configurations and geometries for the detection of abandoned mineshafts by 3D cross-hole electrical resistivity tomography [J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2006, 11(1):213-221.

[7] Jonathan E C, Paul B W, Alan L W, et al. Mineshaft imaging using surface and crosshole 3D electrical resistivity tomography: a case history from the East Pennine Coalfield, UK[J]. Journal of Applied Geophysics, 2007, 62(4):324-337.

[8] 吴小平,徐果明. 利用共轭梯度法的电阻率三维反演研究[J]. 地球物理学报,2000,43(3):420-427.

[9] 阮百尧,村上裕,徐世浙. 电阻率/激发极化率数据的二维反演程序[J]. 物探化探计算技术,1999,21(1):116-125.

[10] 徐凯军,李桐林,张辉,等. 基于共轭梯度法的垂直有限线源三维电阻率反演[J]. 煤田地质与勘探,2006,34(3):69-71.

[11] 安然,李桐林,徐凯军. 井地三维电阻率反演研究[J]. 地球物理学进展,2007, 22(1):247-249.

[12] 柯敢攀,黄清华. 井地电法的三维正反演研究[J]. 北京大学学报:自然科学版,2008,40:62-70.

[13] 吕玉增,阮百尧. 复杂地形条件下四面体剖分电阻率三维有限元数值模拟[J]. 地球物理学进展,2006,21(4):1302-1308.

[14] 吕玉增. 地-井、井-地 IP 三维快速正反演研究[D]. 长沙:中南大学,2008.

THREE-DIMENSIONAL FAST INVERSION OF BOREHOLE-SURFACE DATA

LV Yu-zeng[1,2], RUAN Bai-yao[2], PENG Su-ping[1]

(1. *State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Beijing* 100083, *China*; 2. *College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin* 541004, *China*)

Abstract: Based on an analysis of coefficient matrix formed from three-dimensional FEM (finite element method) forward with tetrahedral cells division, the authors used MSR (Modified Sparse Row) memory method and SSOR-PCG for solving equations to realize the fast forward of borehole-surface IP surveying. The inversion technique is based on the least-squares and CG (conjugate gradient), and it makes use of the simple relationship between Jacobian matrix A and the forward equation, which needs only to solve and multiplying a vector and avoids direct calculation and access of matrix . The 3-D fast inversion with minutes of PC time is achieved. The inversion results of three-dimensional borehole-surface forward synthetic data reproduce the known models approximately.

Key words: borehole-surface IP; induced polarization (IP); least-squares fast inversion

作者简介: 吕玉增(1978-),男,河北邢台人,在读博士后,副教授,主要从事电法数值模拟与反演成像研究。