

李 勇,林品荣,徐宝利,等.复杂地形三维直流电阻率有限元数值模拟.地球物理学进展,2009,24(3):1039~1046,DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.03.031.

Li Y,Lin P R,Xu B L,*et al*FEM numerical modeling of 3-D DC resistivity under complicated terrain.*Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(3):1039~1046,DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.03.031.

复杂地形三维直流电阻率有限元数值模拟

李 勇¹, 林品荣¹, 徐宝利¹, 王有学²

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,廊坊 065000; 2. 桂林理工大学资源与环境工程系,桂林 541004)

摘 要 系统地论述了用有限单元法研究复杂地形条件下三维直流电阻率的正演计算技术.首先给出了三维构造中点源电场的边值问题以及相应的变分问题;然后利用有限单元法求解变分问题,采用四面体单元对研究区域进行剖分,在单元中进行三线性函数插值,将变分方程化为线性代数方程组;最后,考虑到节约计算时间,利用对称超松弛预条件共轭梯度迭代算法求解大型线性方程组,得到了各节点的电位值,进而计算出地表的视电阻率.通过理论模型的计算检验了算法的可行性之后,给出了几种常见纯地形异常的数值模拟结果和一个组合模型的计算结果,其研究工作作为研究三维直流电阻率反演奠定了基础.

关键词 有限单元法,直流电阻率法,复杂地形,三维

DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.03.031

中图分类号 P631

文献标识码 A

FEM numerical modeling of 3-D DC resistivity under complicated terrain

LI Yong¹, LIN Pin-rong¹, XU Bao-li¹, WANG You-xue²

(1. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Science, Langfang 065000, China;*

2. *Department of Resources and Environment Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)*

Abstract The computation technique of forward modeling for three-dimensional DC resistivity under complicated terrain using the finite element method is systematically described in this paper. Firstly, the three-dimension boundary question and its corresponding variation question concerning the point-source electrical field on a 3-D structure are presented. Secondly, the finite element method is used to solve the variational equation. The study area is divided into many tetrahedral elements. Then, we interpolate with a tri-linear function in each element. So, the variational equation is converted into a linear equation system. Finally, taking into account saving of time, we make use of symmetric successive overrelaxation preconditioned conjugate gradient algorithm to solve large linear system, and obtain the potential value of each node, resulting in the calculation of the apparent resistivity values on the ground surface. We test the effectiveness of the algorithm through theoretical model calculations, and give a few numerical modeling results of several common terrains and a combined model. This research effort has setup a basis for research of three-dimensional DC resistivity inversion.

Keywords finite element method (FEM), DC resistivity, complicated terrain, three-dimensional, (3-D)

收稿日期 2008-09-12; 修回日期 2009-02-22.

基金项目 国家 863 重点项目(2007AA060601),中国地质调查局项目(1212010660301)和中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所基本科研业务费专项资金(AS2007J14)联合资助.

作者简介 李勇,男,1980 年生,硕士,主要从事地球物理电磁方法技术应用研究.(E-mail:liyong@igge.cn)

0 引 言

直流电阻率法的三维正、反演问题是地球物理学研究的热点之一,其正演计算的关键在于在保证计算精度的前提下,如何有效加快计算时间. 另外,地形影响作为主要的地质噪声,乃是山区直流电阻率法工作的难题. 地形变化改变了正常电场的分布规律,严重时甚至淹没区域异常. 因此,必须研究地形影响的特征及规律,进而设法加以消除,以期获得地下实际的电性结构分布.

关于直流电阻率法三维正演问题,国内外学者已做过一些研究工作. 上世纪 70 年代末期,Dey 和 Morrison^[1]将混合边界条件引入有限差分法中,首次对三维形状地质体的电阻率进行正演模拟;1981 年,Scriba^[2]对三维断面的电场响应也进行了论述,Pridmore 等^[3]对有限单元法三维地电断面电法/电磁法的正演问题进行论述;随后,Truman 等^[4]研究了三维地形对电阻率的影响并进行校正,Yuguo 等^[5]比较了三维直流电阻率有限元和有限差分算法研究;田宪漠^[7]、徐世浙^[8~10]用边界单元法成功解决了三维地电断面的正演模拟问题,但边界单元法对解决地下物性分布复杂的情况不具有优势;阮百尧、熊彬^[11~12]求解了三维点源场的正演问题,取得了较好的效果;近年来,吴小平等^[14~17]将共轭梯度算法应用于求解电阻率三维有限元、有限差分计算所形成的大型线性方程组中,使得三维正演计算的速度进一步提高.

在吸收上述部分前人工作成果的基础上将以修正,我们对复杂地形三维直流电阻率有限元数值模拟进行研究,先用六面体单元将研究区域进行离散化处理,然后再进一步将六面体单元剖分为六个四面体,解大型系数矩阵方程组时采用对称超松弛预条件共轭梯度算法,实现了以求解复杂地形点源电场分布为基础的直流电阻率法三维数值模拟实用算法.

1 边值问题

将点电源置于地面 A 点,电流强度为 $\mathbf{I}$,三维构造电场电位 U 的边值问题可归纳为:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla U) = -2\mathbf{I}\delta(A) \quad \in \Omega, \tag{1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial n} = 0 \quad \in \Gamma_s, \tag{2}$$

$$\frac{\partial U}{\partial n} + \frac{\cos(r,n)}{r}U = 0 \quad \in \Gamma_\infty, \tag{3}$$

式中 σ 是地下介质的电导率, δ 为狄拉克函数, n 是边界外法线方向的坐标变量, r 为源点到边界上点的向径, Γ_s 为区域 Ω 的地面边界, Γ_∞ 为区域 Ω 的地下边界.

2 变分问题

可以构造泛函:

$$\mathbf{I}(U) = \int_\Omega \left[\frac{1}{2} \sigma (\nabla U)^2 - 2\mathbf{I}\delta(A)U \right] d\Omega,$$

则其变分为:

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{I}(U) &= \int_\Omega [\sigma \nabla U \cdot \nabla \delta U - 2\mathbf{I}\delta(A)\delta U] d\Omega \\ &= \int_\Omega \{ \nabla \cdot (\sigma \nabla U \delta U) - [\nabla \cdot (\sigma \nabla U) + 2\mathbf{I}\delta(A)]\delta U \} d\Omega. \end{aligned}$$

将(1)式代入上式,得:

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{I}(U) &= \int_\Omega \nabla \cdot (\sigma \nabla U \delta U) d\Omega \\ &= \int_{\Gamma_s + \Gamma_\infty} \sigma \frac{\partial U}{\partial n} \delta U d\Gamma. \end{aligned}$$

将(2,3)式代入上式并移项,可得:

$$\sigma \left[\mathbf{I}(U) + \frac{1}{2} \int_{\Gamma_\infty} \frac{\sigma \cos(r,n)}{r} U^2 d\Gamma \right] = 0.$$

所以,与前一节所述边值问题(1)、(2)、(3)等价的变分问题为:

$$\begin{aligned} F(U) &= \int_\Omega \left[\frac{1}{2} \sigma (\nabla U)^2 - 2\mathbf{I}\delta(A)U \right] d\Omega \\ &\quad + \frac{1}{2} \int_{\Gamma_\infty} \frac{\sigma \cos(r,n)}{r} U^2 d\Gamma, \end{aligned} \tag{4}$$

$$\delta F(U) = 0. \tag{5}$$

3 有限单元法

3.1 研究区域的网格化

首先对研究区域剖分将其离散化. 为较好地拟合复杂地形,同时又考虑不增加原有网格节点个数,作者采用文献 13 中的网格剖分方式. 先用一系列平行的平面沿 x 、 y 、 z 三个坐标轴方向分别以不同的间距将研究区域划分成 $M \times N \times L$ 个小的长方体网格单元,如图 1 所示,并将节点编号,然后加上地形数据. 在此基础上,再将“变形六面体单元”细分成六个四面体,此时,四面体单元总数为 $M \times N \times L \times 6$. 这样剖分,不仅可以足够近似地模拟一般常见的不平地形和电性异常体,而且由于方程的个数并没有增加则使得计算时间几乎未增加^[13].

整个四面体的剖分过程^[13],如图 2 所示. 以 1、2、3、 $\cdots$ 、8 表示单元节点,其分布遵循图中的右手螺

旋关系. 这样, 变分方程(4)中对区域 Ω 和边界 Γ_∞ 的积分可分解为对四面体单元 e 和 Γ_e 的积分之和:

$$\begin{aligned} F(\boldsymbol{U}) = & \sum_{\Omega} \int_e \left[\frac{1}{2} \sigma (\nabla \boldsymbol{U})^2 \right] d\Omega \\ & + \sum_{\Omega} \int_e [-2\boldsymbol{I} \delta(A) \boldsymbol{U}] d\Omega \\ & + \sum_{\Gamma_\infty} \int_{\Gamma_e} \frac{\sigma \cos(r, n)}{r} \boldsymbol{U}^2 d\Gamma. \end{aligned} \tag{6}$$

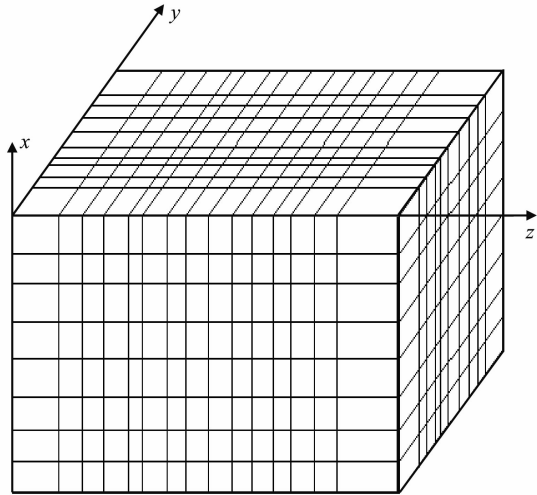


图1 网格剖分示意图

Fig.1 Schematic diagram for finite element mesh

3.2 线性插值

在四面体单元内进行线性函数插值, 设 $\boldsymbol{U} = N_1U_1 + N_2U_2 + N_3U_3 + N_4U_4$

$$= \sum_{j=1}^4 N_j U_j,$$

是单元中的线性函数, 其中

$$N_j = \frac{V_j}{V} = \frac{1}{6V} (a_j x + b_j y + c_j z + d_j),$$

是形函数; U_j 是单元中 4 个节点待定电位值; V 是四面体单元的体积; a_j 、 b_j 、 c_j 、 d_j ($j = 1, 2, 3, 4$) 是只与四面体单元顶点坐标有关的常数.

3.3 单元分析

式(6)第 1 项单元积分

$$\begin{aligned} \int_e \frac{1}{2} \sigma (\nabla \boldsymbol{U})^2 d\Omega &= \int_e \frac{1}{2} \sigma \left[\left(\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz \\ &= \frac{1}{2} \sigma \int_e \left[\left(\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz \\ &= \frac{\sigma}{2} \boldsymbol{U}_e^T \boldsymbol{K}_{1e} \boldsymbol{U}_e. \end{aligned} \tag{7}$$

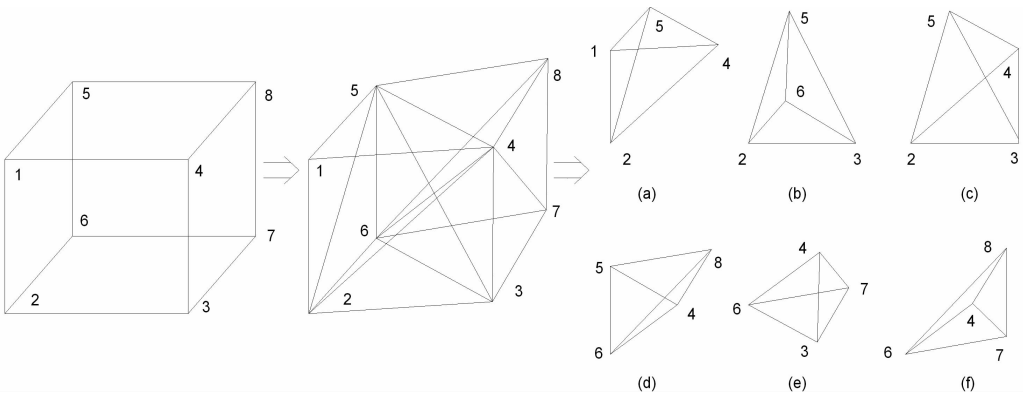


图2 四面体单元示意图

Fig.2 Sketch of tetrahedral element

其中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{K}_{1e} &= (k_{1ij}), k_{1ij} = k_{1ji}, \\ \boldsymbol{U}_e &= (U_j)^T, i, j = 1, 2, 3, 4 \end{aligned}$$

求偏导:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial x} &= \frac{\partial N_1}{\partial x} U_1 + \frac{\partial N_2}{\partial x} U_2 + \frac{\partial N_3}{\partial x} U_3 + \frac{\partial N_4}{\partial x} U_4 \\ &= \left(\frac{\partial N}{\partial x} \right)^T \boldsymbol{U}_e = \boldsymbol{U}_e^T \left(\frac{\partial N}{\partial x} \right), \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial N}{\partial x} \right)^T &= \left(\frac{\partial N_1}{\partial x} \frac{\partial N_2}{\partial x} \frac{\partial N_3}{\partial x} \frac{\partial N_4}{\partial x} \right) \\ &= \frac{1}{6V} (a_1 a_2 a_3 a_4) \end{aligned}$$

同理, 可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial y} &= \frac{\partial N_1}{\partial y} U_1 + \frac{\partial N_2}{\partial y} U_2 + \frac{\partial N_3}{\partial y} U_3 + \frac{\partial N_4}{\partial y} U_4 \\ &= \left(\frac{\partial N}{\partial y} \right)^T \boldsymbol{U}_e = \boldsymbol{U}_e^T \left(\frac{\partial N}{\partial y} \right), \end{aligned} \tag{9}$$

式中

$$\begin{aligned}\left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^{\mathrm{T}} &= \left(\frac{\partial N_1}{\partial y} \frac{\partial N_2}{\partial y} \frac{\partial N_3}{\partial y} \frac{\partial N_4}{\partial y}\right) \\ &= \frac{1}{6V}(b_1 b_2 b_3 b_4),\end{aligned}$$

及

$$\begin{aligned}\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial \boldsymbol{z}} &= \frac{\partial N_1}{\partial \boldsymbol{z}} \boldsymbol{U}_1 + \frac{\partial N_2}{\partial \boldsymbol{z}} \boldsymbol{U}_2 + \frac{\partial N_3}{\partial \boldsymbol{z}} \boldsymbol{U}_3 + \frac{\partial N_4}{\partial \boldsymbol{z}} \boldsymbol{U}_4 \\ &= \left(\frac{\partial N}{\partial \boldsymbol{z}}\right)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{U}_e = \boldsymbol{U}_e^{\mathrm{T}} \left(\frac{\partial N}{\partial \boldsymbol{z}}\right), \\ \left(\frac{\partial N}{\partial \boldsymbol{z}}\right)^{\mathrm{T}} &= \left(\frac{\partial N_1}{\partial \boldsymbol{z}} \frac{\partial N_2}{\partial \boldsymbol{z}} \frac{\partial N_3}{\partial \boldsymbol{z}} \frac{\partial N_4}{\partial \boldsymbol{z}}\right) \\ &= \frac{1}{6V}(c_1 c_2 c_3 c_4).\end{aligned}\tag{10}$$

将式(8~10)式代入(7)式中,可得:

$$\begin{aligned}k_{1ij} &= \int_e \left[\left(\frac{\partial N}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)^{\mathrm{T}} + \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^{\mathrm{T}} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial N}{\partial z}\right) \left(\frac{\partial N}{\partial z}\right)^{\mathrm{T}} \right] \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z \\ &= \frac{1}{36V}(a_i a_j + b_i b_j + c_i c_j),\end{aligned}\tag{11}$$

式(6)第 2 项积分:

$$\int_e [-2\boldsymbol{I} \delta(\boldsymbol{A}) \boldsymbol{U}] \mathrm{d}\Omega = -\boldsymbol{U}_A \boldsymbol{I},\tag{12}$$

只与电源点的 $\boldsymbol{U}_A$ 有关.

式(6)第 3 项积分是对 Γ_∞ 的边界积分,当单元 e 的一个面 $\overline{123}$ (如图 2)落在无穷远边界上时,由于无穷远边界离点源较远,可将 $B = \frac{\cos(r,n)}{r}$ 看做常数,提至积分号之外,因此,式(6)第 3 项的边界积分为:

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \int_{\Gamma_\infty} \frac{\sigma \cos(r,n)}{r} \boldsymbol{U}^2 \mathrm{d}\Gamma &= \frac{B\sigma}{2} \int_{\Gamma_\infty} \boldsymbol{U}^2 \mathrm{d}\Gamma \\ &= \frac{\sigma}{2} \boldsymbol{U}_e^{\mathrm{T}} \boldsymbol{K}_{2e} \boldsymbol{U}_e,\end{aligned}\tag{13}$$

其中

$$\boldsymbol{K}_{2e} = \boldsymbol{B} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{\Delta}{12},$$

式中 Δ 为单元 e 在 Γ_∞ 上的三角面的面积(当单元 e 落在 Γ_∞ 上的面 $\overline{123}$ 不平行坐标平面时, $\overline{123}$ 的外法线方向 n 将用实际坐标来计算).

3.4 总体合成

将对(6)式各项单元积分后所得结果相加,再扩展成由全节点组成的矩阵,进而全部单元相加,得:

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{U}) = \sum \boldsymbol{F}_e(\boldsymbol{U})$$

$$\begin{aligned}&= \sum \frac{\sigma}{2} \boldsymbol{U}_e^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{K}_{1e} + \boldsymbol{K}_{2e}) \boldsymbol{U}_e - \boldsymbol{U}_A \boldsymbol{I} \\ &= \sum \frac{1}{2} \boldsymbol{U}_e^{\mathrm{T}} \boldsymbol{K}_e \boldsymbol{U}_e - \boldsymbol{U}_A \boldsymbol{I} \\ &= \sum \frac{1}{2} \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \overline{\boldsymbol{K}}_e \boldsymbol{U} - \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \\ &= \frac{1}{2} \boldsymbol{U}_e^{\mathrm{T}} \sum \overline{\boldsymbol{K}}_e \boldsymbol{U} - \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \\ &= \frac{1}{2} \boldsymbol{U}_e^{\mathrm{T}} \boldsymbol{K} \boldsymbol{U} - \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P},\end{aligned}\tag{14}$$

其中 $\boldsymbol{U}$ 是全部节点组成的列向量;

$\boldsymbol{K}_e = \sigma(\boldsymbol{K}_{1e} + \boldsymbol{K}_{2e})$,
 $\overline{\boldsymbol{K}}_e$ 是 $\boldsymbol{K}_e$ 的扩展矩阵,

$$\boldsymbol{K} = \sum \overline{\boldsymbol{K}}_e, \boldsymbol{P} = (0 \cdots \boldsymbol{U}_A \cdots 0)^{\mathrm{T}},$$

$\boldsymbol{P}$ 中只有与电源点 A 所在节点相对应的为 $\boldsymbol{U}_A$,其余均为零.

3.5 求变分、解方程组和视电阻率的求解

令式(14)的变分为零,得线性方程组:

$$\boldsymbol{K} \boldsymbol{U} = \boldsymbol{P},\tag{15}$$

式中 $\boldsymbol{K}$ 为大型线性稀疏系数矩阵; $\boldsymbol{U}$ 为待求解的各网格单元节点处的电位向量; $\boldsymbol{P}$ 为与点源 A 有关的向量.

根据最优化问题和线性代数方程组的求解理论,若系数 K 为对称正定情况,共轭梯度迭代算法是求解具有大型系数矩阵的线性代数方程组的有效方法,采用共轭梯度迭代算法可避免对系数矩阵中大量零元素的操作,显然可以大大提高计算速度.但是,对于三维直流电阻率有限元数值模拟问题,计算形成的大型方程组的系数矩阵 K 的条件数必然很大,致使共轭梯度方法迭代非常缓慢,因此必须对系数矩阵 K 进行预条件因子化,改善矩阵 K 的条件数.因此,我们引入对称超松弛共轭梯度算法(SSOR-PCG)^[17]来求解(15)式.

先将系数矩阵 $\boldsymbol{K}$ 分解为:

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{E} + \boldsymbol{I} + \boldsymbol{E}^{\mathrm{T}},$$

其中 $\boldsymbol{E}$ 是下三角矩阵, $\boldsymbol{I}$ 是单位矩阵.

其预条件矩阵定义为:

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{A} \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}},$$

其中

$$\boldsymbol{A} = (\boldsymbol{I} + \mu \boldsymbol{E}),$$

μ 是松弛因子,通常取 $\mu = 1.4$.

然后仿照不完全乔累斯基分解预处理的双共轭梯度迭代方法^[15],可求得(15)式的 SSOR 预条件共轭梯度迭代过程如下:

$$\boldsymbol{r}_0 = \boldsymbol{P} - \boldsymbol{K} \boldsymbol{U}_0, \boldsymbol{M}_0 = (\boldsymbol{A} \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}})^{-1} \boldsymbol{r}_0,$$

$$\alpha_i = (r_i, (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}r_i)/(M_i, KP_i),$$
$$U_{i+1} = U_i + \alpha_i M_i,$$
$$r_{i+1} = r_i - \alpha_i M_i,$$
$$\beta_i = (r_{i+1}, (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}r_{i+1})/(r_i, (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}r_i),$$
$$P_{i+1} = (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}r_{i+1} + \beta_i M_i,$$
$$i = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

其中 r_0 、 M_0 是共轭梯度迭代的初始化向量; U_0 是解的初值, 一般给定为零向量; α 、 β 为常数。

将 SSOR-PCG 迭代算法有机结合系数矩阵的稀疏存储模式来求解线性方程组, 使得计算速度大大提高而内存需求则大大减少, 若对这一方面有更深入的了解可直接参看文献^[15~17]。

通过上述 SSOR 预条件共轭梯度迭代即求得研究区域各节点的总电位 U , 然后根据电阻率装置按下式即可求得视电阻率:

$$\rho_s = K \frac{U(M) - U(N)}{I},$$

式中, K 为各种不同电阻率法的装置系数; $U(M)$ 、 $U(N)$ 分别是测量电极 M 、 N 所在节点的电位值。

4 算法可行性检验

模型 1: 根据上述理论基础, 我们编制了复杂地形直流电阻率三维有限元数值模拟计算程序。为了验证计算方法以及程序编制的正确性和计算速度, 以水平地形层状大地 H 型断面为例, 第一层电阻率为 50 ohm. m, 厚度为 5 m; 第二层电阻率为 10 ohm. m, 厚度为 5 m; 第三层电阻率为 100 ohm. m, 如图 3 所示。三维网格剖分为 $40 \times 30 \times 15$, 在 CPU 主频为 1.83 GHz 的计算机上, 耗时 246 s。三维数

值模拟的计算结果 (denotes solution from 3D FEM)、解析解的计算结果 (denotes analytic solution) 以及相对误差绝对值 (relative error) 如表 1 和图 3a 所示。这里, 解析解采用数值滤波法计算。从图 3a 可以看出, 两种不同算法的结果拟和得非常好, 并从表 1 的模拟数值和相对误差绝对值可以看出, 三维数值模拟解达到了较好的精度, 误差在接受范围之内。

表 1 三维有限元数值模拟解与精确解对比
Table 1 Comparision of analytical solution and 3-D FEM result

AM/2(m)	三维有限单元解(ohm. m)	精确解(ohm. m)	相对误差绝对值(%)
3	23.76	24.06	1.26
4	19.93	20.09	0.80
5	18.34	18.45	0.60
6	18.11	18.38	1.49
7	18.85	19.10	1.33
8	19.92	20.24	1.61
9	21.88	21.55	1.51
10	23.27	22.92	1.50
11	24.48	24.26	0.90
12	25.76	25.56	0.78
13	27.01	26.79	0.81
14	28.23	27.95	0.99
15	29.38	29.03	1.19
16	30.46	30.03	1.41
17	31.39	30.96	1.37
18	32.03	31.81	0.69
19	33.18	32.58	1.81
20	33.99	33.28	2.09

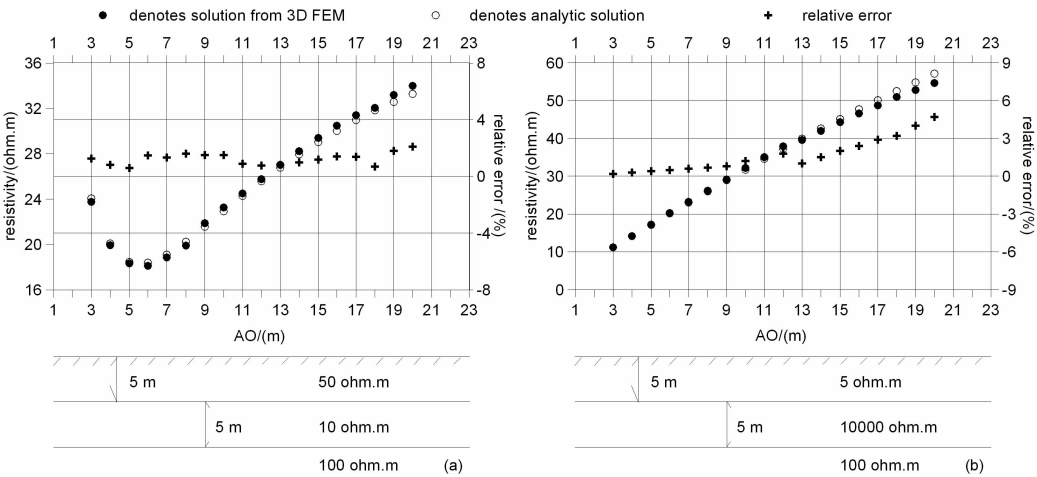


图 3 三维有限单元法结果和数值滤波解计算结果对比
Fig. 3 Comparison of 3-D FEM result with numerical filter wave numerical solution

为了进一步检验电阻率差异较大情况下计算程序的稳定性和有效性. 我们选取一 K 型断面试算, 第一层电阻率为 5 ohm. m, 厚度为 5 m; 第二层电阻率为 10000 ohm. m, 厚度为 5 m; 第三层电阻率为 100 ohm. m. 精确解仍采用数值滤波法计算. 其结果对比如图 3b 所示, 可以看出两种算法的结果数值接近, 相对误差绝对值小, 说明本算法对于电阻率差异很大的模型计算稳定性好.

模型 2: 为了验证本算法对起伏地形的计算效

果, 我们对典型纯地形(山谷地形、山脊地形、倾斜地形和直立陡倾地形)其均匀半空间电阻率为 10 ohm. m 且形态垂直纸面向里延伸引起的异常畸变进行模拟计算, 测量装置均采用二极装置(其参数为: 极距 $AM=2$ m、点距 2 m), 其计算结果如图 4 所示. 从图中可以看出, 除地形变化剧烈的点(如山顶)误差较大外, 其余各点和二维有限单元法计算值基本吻合, 证明本算法应用于复杂地形三维电阻率的正演计算是行之有效的.

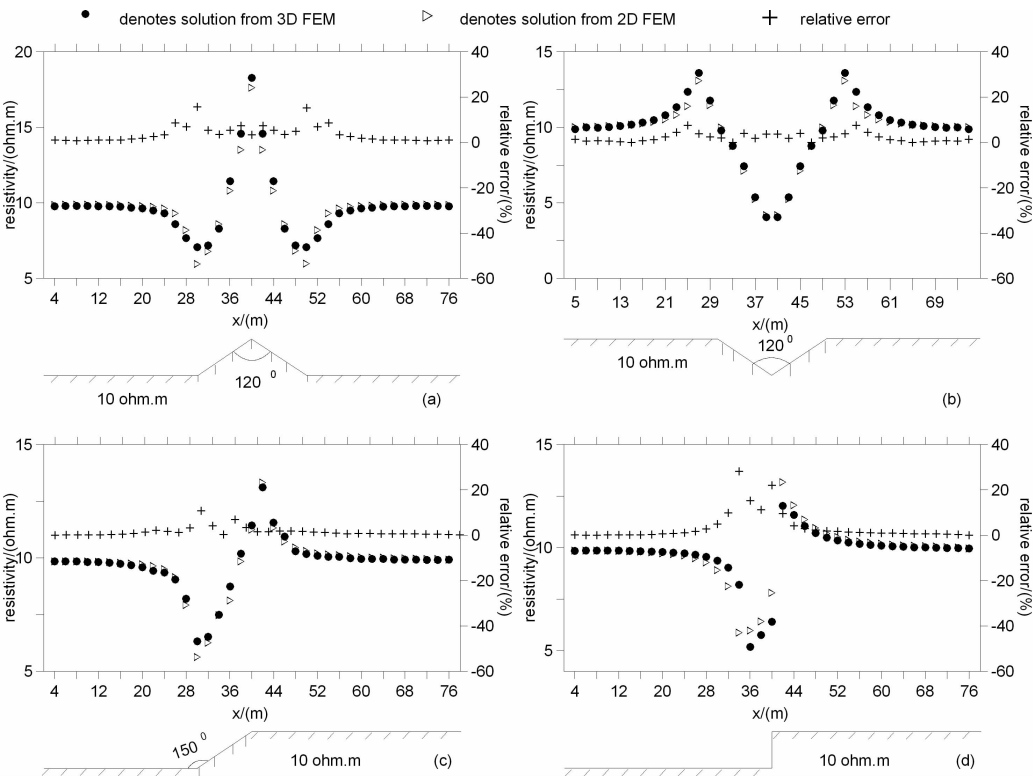


图 4 典型纯地形的数值模拟结果图
(a) 山脊地形; (b) 山谷地形; (c) 斜坡地形; (d) 直立陡倾地形
Fig. 4 The numerical simulation results of typical pure terrains
(a) Ridge topography; (b) Valley form; (c) Sloping terrain; (d) vertical steep terrain

5 算例研究

模型为一个垂直纸面向里延伸的山谷, 正下方离谷底 1 m 处还赋存有一 $2\text{ m}\times 2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 大小的正方体异常体, 其电阻率为 100 ohm. m, 围岩电阻率为 10 ohm. m. 采用二极装置 AM 测深法, 测线与山谷的轴线垂直, 测线上的电极对称地形布置, 异常体中心线在地面的垂直投影恰好在 L01 上, L02 测线、L03 测线分别距 L01 测线 10 米和 40 米, 如图 4a 所示.

图 5b 为二极装置 AM 测深剖面 L01、L02、L03 的视电阻率等值线图, 其技术参数为: 记录点为 AM 的中点、 $AM=2$ m、点距 2 m. 从 $y=0$ m 的计算结果图可以看出, 地形对视电阻率的影响很大, 它改变了异常体在空间的分布特征, 在高阻异常背景上叠加了一个低阻异常, 因此, 若不进行地形校正或带地形的反演计算, 将会得出错误的结论. 将 $y=0$ m、 $y=10$ m 和 $y=40$ m 时的三个计算结果图加以对照, 不难发现, 随着测线偏离异常体中心线在地面的垂直投影线, 视电阻率的曲线形态逼真地反映了异

常体由于空间分布的影响情况. 若不进行带地形的三维反演计算,在测线 L02、L03 仅靠视电阻率等值线图也将造成错误的解释.

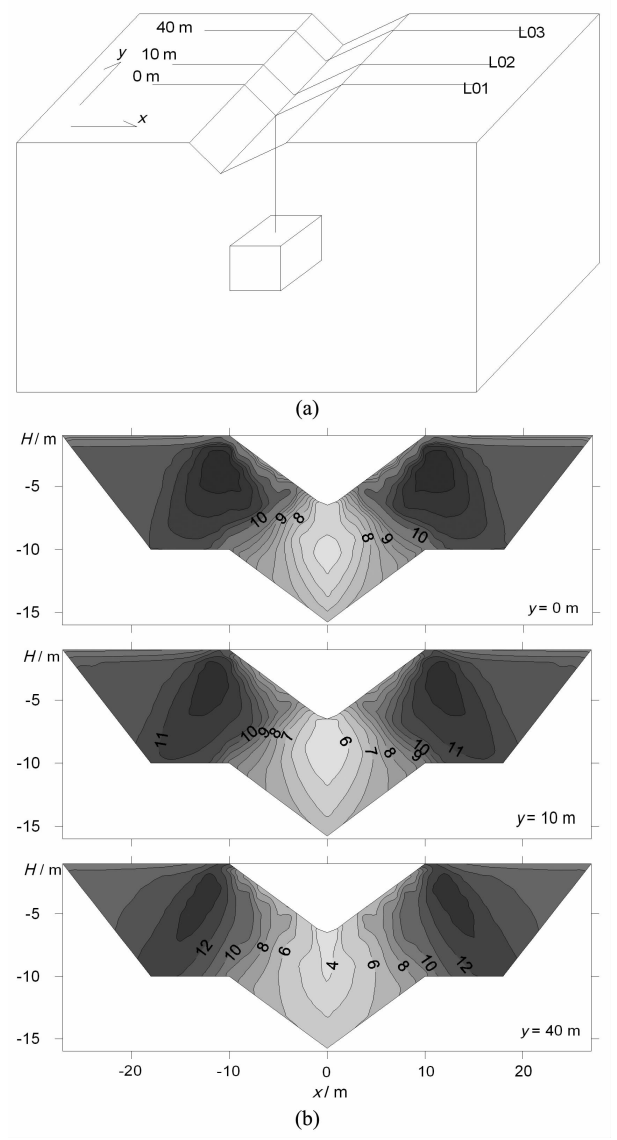


图 5 模型 2 及其数值模拟结果图

(a)模型示意图;(b)不同测线的视电阻率(欧姆米)断面等值线图

Fig. 5 Model 2 and numerical modelling results

(a)Sketch of model 2;(b)Apparent resistivity(ohm. m) contours of different survey lines

6 结 论

在研究复杂地形三维直流电阻率有限元数值模拟算法过程中,我们从点源三维构造电场电位的边值问题出发,推导了其变分问题;在求解变分问题过程中,采用了适用于模拟地形的四面体单元剖分空间,同时采用目前先进的求解大型系数矩阵方程组

的对称超松弛预条件共轭梯度迭代算法,这样提高了其正演计算技术的稳定性、计算速度和计算精度. 所实现的三维数值模拟算法具有迭代收敛稳定、计算精度高、速度快、适于模拟复杂地形三维地电模型等特点,为理论研究复杂地形三维地电构造中点源电场电位的分布和特征提供了有效的计算工具,同时为研究直流电阻率三维反演奠定了基础.

值得注意的是,限于篇幅,本文作者给出的计算模型相对简单,有关的应用及更多的计算实例(例如不同三维地形条件、各种三维异常体上不同技术装置的视电阻率异常特征及变化规律等)将在后续的文章中介绍.

致 谢 在本项研究过程中,作者曾得到中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所计算中心顾观文同志的指导与帮助,在此表示感谢!

参 考 文 献 (References):

[1] Dey A, Morrison H F. Resistivity modeling for arbitrarily type curves for three-dimensional structures[J]. Geophysical Prospecting,1979,27:106~136.

[2] Scriba H. Computation of the electrical potential in three-dimensional structures[J]. Geophysical Prospecting,1981,44 (1):80~92.

[3] Pridmore D F, Hohmann G W, Ward S H, Sill W R. An investigation of finite-element modeling for electrical and electromagnetic data in three dimensions[J]. Geophysics, 1981,46:1009~1024.

[4] Truman H T, George R J. Three-dimensional terrain corrections in resistivity surveys[J]. Geophysics,1984,49(4): 439~452.

[5] Yuguo L, Klaus Spitzer. Three-dimensional DC resistivity forward modeling using finite elements in comparison with finite-difference solutions [J]. Geophysical Journal International,2002,151(3):924~934.

[6] Papadrakakis M. Accelerating vector iteration methods. J. Appl. Mech.,1986,53:291~297.

[7] 田宪漠,黄兰珍. 点源场电阻率法三维地形改正的边界元法[J]. 成都地质学院学报,1986,13(3):170~175.

Tian X M,Huang L Z. The boundary element method of the 3-D topographic correction for the resistivity method in the point source field[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration(in Chinese),1986,13(3):170~175.

[8] 徐世浙. 三维地形均匀各向异性岩石点源电场的边界单元解法[J]. 山东海洋学院学报,1985,15(2):54~61.

Xu S Z. The boundary element method solving point source electric field under the circumstances of three-dimensional topography and homo-anisotropic rock [J]. Journal of Shandong College of Oceanology(in Chinese),1985,15(2):54 ~61.

[9] 徐世浙,赵生凯. 三维地形上点电源电场的边界单元解法[J]. 桂林冶金地质学院学报,1985,5(2):163~168.
Xu S Z,Zhao S K. The boundary element method calculating electric field of a point source on three-dimensional topography [J]. Journal of Guilin College of Geology(in Chinese),1985,5 (2):163~168.

[10] 徐世浙,倪逸. 复杂地电条件下点源三维电阻率模拟的新方法[J]. 物探化探计算技术,1991,11(1):13~20.
Xu S Z,Ni Y. A new method for modeling the resistivity surveys with point source on 3-D arbitrary nonhomogeneous geoelectrical section [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration(in Chinese),1991, 11(1):13~20.

[11] 阮百尧,熊彬,徐世浙. 三维地电断面电阻率测深有限元数值模拟[J]. 地球科学,2001,26(1),73~77.
Ruan B Y,Xiong B,Xu S Z. Finite element method for modeling resistivity sounding 3-D geoelectric section [J]. Earth Science(in Chinese),2001,26(1):73~77.

[12] 阮百尧,熊彬. 电导率连续变化的三维电阻率测深有限元数值模拟[J]. 地球物理学报,2002,45(1),131~138.
Ruan B Y,Xiong B. A finite element modeling of three-dimensional resistivity sounding with continuous conductivity [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2002, 45 (1): 131 ~138.

[13] 熊彬,阮百尧,罗延钟. 复杂地形条件下直流电阻率异常三维数值模拟研究[J]. 地质与勘探,2003,39(4):60~64.
Xiong B,Ruan B Y,Luo Y Z. 3-D numerical simulation study of DC resistivity anomaly under complicated terrain [J]. Geology and Prospecting(in Chinese),2003,39(4):60~64.

[14] 吴小平,徐果名. 不完全 Cholesky 共轭梯度法及其在地电场计算中的应用[J]. 石油地球物理学报,1998,33(1):89~94.
Wu X P,Xu G M. Incomplete Cholesky conjugate gradient method and its application in geoelectric field computation [J]. Oil Geophysical Prospecting(in Chinese),1998,33(1): 89~94.

[15] 吴小平,徐果名. 利用 ICCG 迭代技术加快电阻率三维正演计算[J]. 煤田地质与勘探,1999,27:62~66.
Wu X P,Xu G M. 3-D resistivity forward calculation accelerated by ICCG iteration technique[J]. Coal Geology & Exploration,1999,27:62~66.

[16] 吴小平,徐果名,李时灿. 利用不完全 Cholesky 共轭梯度法求解点源三维电场[J]. 地球物理学报,1998,41(6):848~855.
Wu X P,Xu G M,Li S C. Geoelectric field of point source by incomplete cholesky conjugate gradient method[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese),1998,41(6):848~855.

[17] 吴小平,汪彤彤. 利用共轭梯度算法的电阻率三维有限元正演[J]. 地球物理学报,2003,46(3):428~432.
Wu X P,Wang T T. A 3-D finite-element resistivity forward modeling using conjugate gradient algorithm[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese),2003,46(3):428~432.

[18] 徐世浙. 地球物理中的有限单元法[M]. 北京:科学出版社,1994,178~189.
Xu S Z. The finite element method in geophysics [M]. Beijing:Science Press,1994,178~189.

[19] 何亮,王旭东,杨放,曹华. 探地雷达测定土壤含水量的研究进展[J]. 地球物理学进展,2007,22(5):1673~1679.
He L, Wang X D,Yang F,Cao H. Estimation of soil water content by Ground Penetrating Radar [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007,22(5):1673~1679.

[20] 屈有恒,张贵宾,赵连锋,文战久. 井地有限线源三维电阻率反演研究[J]. 地球物理学进展,2007,22(5):1393~1402.
Qu Y H,Zhang G B,Zhao L F,Wen Z J. Study on 3-D resistivity inversion for infinite surface-borehole line current source[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007,22 (5):1393~1402.

[21] 何继善. 频率域电法的新进展[J]. 地球物理学进展,2007,22(4):1250~1254.
He J S. The new development of frequency domain electro-prospecting[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(4):1250~1254. .

[22] 汤井田,任政勇,化希瑞. 地球物理学中的电磁场正演与反演[J]. 地球物理学进展,2007,22(4):1181~1194.
Tang J T,Ren Z Y,Hua X R. The forward modeling and inversion in geophysical electromagnetic field[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007,22(4):1181~1194.

作者: [李勇](#), [林品荣](#), [徐宝利](#), [王有学](#), [LI Yong](#), [LIN Pin-rong](#), [XU Bao-li](#), [WANG You-xue](#)

作者单位: [李勇, 林品荣, 徐宝利, LI Yong, LIN Pin-rong, XU Bao-li \(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊, 065000\)](#), [王有学, WANG You-xue \(桂林理工大学资源与环境工程系, 桂林, 541004\)](#)

刊名: [地球物理学进展](#) **ISTIC PKU**

英文刊名: [PROGRESS IN GEOPHYSICS](#)

年, 卷(期): 2009, 24(3)

被引用次数: 1次

参考文献(22条)

1. [Dey A. Morrison H F Resistivity modeling for arbitrarily type curves for three-dimensional structures](#) 1979
2. [Scriba H Computation of the electrical potential in threedimensional structures](#) 1981(01)
3. [Pridmore D F. Hohmann G W. Ward S H. Sill W R An investigation of finite-element modeling for electrical and electromagnetic data in three dimensions](#) 1981
4. [Truman H T. George R J Three-dimensional terrain corrections in resistivity surveys](#) 1984(04)
5. [Yuguo L. Klaus Spitzer Three-dimensional DC resistivity forward modeling using finite elements in comparison with finite-difference solutions](#) 2002(03)
6. [Papadrakaki S M Accelerating vector iteration methods](#) 1986
7. [田宪漠, 黄兰珍 点源场电阻率法三维地形改正的边界元法](#) 1986(03)
8. [徐世浙 三维地形均匀各向异性岩石点源电场的边界单元解法](#) 1985(02)
9. [徐世浙, 赵生凯 三维地形上点电源电场的边界单元解法](#) 1985(02)
10. [徐世浙, 倪逸 复杂地电条件下点源三维电阻率模拟的新方法](#) 1991(01)
11. [阮百尧, 熊彬, 徐世浙 三维地电断面电阻率测深有限元数值模拟\[期刊论文\]-地球科学-中国地质大学学报](#) 2001(01)
12. [阮百尧, 熊彬 电导率连续变化的三维电阻率测深有限元数值模拟\[期刊论文\]-地球物理学报](#) 2002(01)
13. [熊彬, 阮百尧, 罗延钟 复杂地形条件下直流电阻率异常三维数值模拟研究\[期刊论文\]-地质与勘探](#) 2003(04)
14. [吴小平, 徐果名 不完全Cholesky共轭梯度法及其在地电场计算中的应用](#) 1998(01)
15. [吴小平, 徐果名 利用ICCG迭代技术加快电阻率三维正演计算\[期刊论文\]-煤田地质与勘探](#) 1999
16. [吴小平, 徐果名, 李时灿 利用不完全Chohsky共轭梯度法求解点源三维电场\[期刊论文\]-地球物理学报](#) 1998(06)
17. [吴小平, 汪彤彤 利用共轭梯度算法的电阻率三维有限元正演\[期刊论文\]-地球物理学报](#) 2003(03)
18. [徐世浙 地球物理中的有限单元法](#) 1994
19. [何亮, 王旭东, 杨放, 曹华 探地雷达测定土壤含水量的研究进展\[期刊论文\]-地球物理学进展](#) 2007(05)
20. [屈有恒, 张贵宾, 赵连锋, 文战久 井地有限线源三维电阻率反演研究\[期刊论文\]-地球物理学进展](#) 2007(05)
21. [何继善 频率域电法的新进展\[期刊论文\]-地球物理学进展](#) 2007(04)
22. [汤井田, 任政勇, 化希瑞 地球物理学中的电磁场正演与反演\[期刊论文\]-地球物理学进展](#) 2007(04)

相似文献(7条)

1. 学位论文 [强建科 起伏地形三维电阻率正演模拟与反演成像研究](#) 2006
长期以来, 研究起伏地形条件下的地电异常是电法勘探中一个难题, 一方面是由于问题本身比较复杂, 另一方面是由于不同时期科技发展水平达不到, 比如, 三维问题, 如果计算机的速度和内存发展不够快, 即使有再好的理论作指导也无法实现。如今计算机的发展已经能够满足速度、精度的要求了, 也就为研究更复杂的地球物理问题提供了有利的发展机会。

起伏地形二维(或二维半)电阻率正演模拟与反演成像经过国内外专家十多年的努力,已经基本解决,而且已广泛应用于生产实践中。水平地形三维正演模拟与反演问题最近几年也有较快发展,研究的方法主要是积分方程法、有限差分法、有限单元法、共轭梯度法等。三维起伏地形对电阻率的影响问题,徐世浙用边界元法较好的解决了正演问题。本文在第一章绪论部分详细讨论了电阻率法的研究意义以及研究方法、正演模拟和反演成像等方面的最新发展。电阻率法方面的这些研究成果为进一步解决三维起伏地形下电阻率的正演模拟和反演成像奠定了基础。

在数值模拟方法中,有限单元法具有很多优点:精度高、解题过程比较规范、能自动满足内部边界条件、适合于各种复杂的物性分布问题。所以本文论的研究方法选择了有限单元法。有限单元法属于区域型数值计算方法,需要在全区域内进行单元剖分。剖分后的单元和节点数目较大,最后得到一个大线性方程组,求解该方程组就可得到所有节点上的电位值。

地形起伏会导致稳定电流场畸变,模拟起伏地形应该选择合适的剖分单元,三棱柱具有这样的特点,只要给定地面上任何三点的高程,就可以唯一确定一块小面积,而且对高程的变化没有限制,这就意味着三棱柱单元可以模拟任意坡度的地形。本文第二章从稳定电流场的基本方程出发,推导了三维区域满足的边值问题,进而把边值问题转化为相应的变分问题,得出变分方程。求解变分方程,需要把目标区域离散成许许多多的三棱柱单元,推导单元三线性插值型函数是有限单元法的关键。本文涉及的三棱柱是含有地形特征的不规则三棱柱,有五个面六个节点,单元刚度矩阵含有 6×6 个元素,其中有21个非零元素,每个元素由30多项含有5个变量的三重积分组成,如果手工计算非常复杂且容易出错,本文通过编制积分算法程序,只要计算一次就可得山21项元素的数学表达式。

研究大型稀疏矩阵的存储问题可以节约内存,提高运算效率。在第二章中,我们采用带变宽、一维数组方式集成所有单元的刚度矩阵,可以节约大量内存。解线性方程组时利用乔勒斯基分解法只分解一次大型稀疏矩阵,通过同代的方法,可以很快解出上百个不同供电点位置时所有网格节点的电位值,这项措施是提高三维正演模拟速度的一个重要环1。试算结果表明,在CPU主频为2.9GHz的计算机上,当依次在125个地面节点上供电,计算18630个节点上的电位时所花费的时间只有6分钟。

为了验证正演模拟算法的正确性,本文在第二章第七节计算了几种标准模型,计算结果满足误差要求。如二层、三层水平地电断面,三维结果与解析解或二维数值解基本一致,相对误差小于4%;在二维山脊上的二极剖面 and 三维山谷上的中间梯度剖面上,其三维计算结果与相应模型的土槽实验结果或边界元法计算结果基本吻合。

众所周知,地形对电阻率法勘探有显著的影响,严重时会使实测数据面目全非,要正确处理和解释这些野外测量数据,首先必须从理论上分析、认识各种地形情况下异常畸变的特征,因此,第三章讨论了复杂地形对直流电法视电阻率的影响问题。在直流电阻率法中,电极的排列组合有很多种,如中间梯度法、二极法、三极法、对称四极法、偶极法等等,可以做剖面测量,也可做测深断面;同一种地形对于不同电极装置,其纯地形引起的异常也完全不同。本章计算了一些特殊的地形纯异常,如三维山谷、三维山脊、二维山谷山脊组合地形以及极端情况下的陡坎地形,一方面说明三维正演算法适合各种地形模拟,另一方面也为其他研究者提供一些参考数据。

本文第四章研究了三维反演问题,总体思路为选择比较成熟的阻尼广义逆迭代反演方法,首先假定地下介质是均匀分布的,用正演的方法计算电场分布,并计算视电阻率。然后与实测的视电阻率值进行对比,如果两者误差较大就修改原来的模型,再进行正演计算,重复上述过程,直到计算值与实测值之间的误差达到规定的要求,此时得出的模型即为所求结果。上述过程就是将非线性地球物理反问题线性化后组成线性方程组求解的过程,其中最关键的技术是形成线性方程组的系数矩阵,也就是偏导数矩阵或雅克比矩阵。偏导数矩阵的计算时间和计算精度,直接影响反演计算的时间和精度,因此,偏导数矩阵的计算是反演问题的关键之一。根据稳定电场的互换原理,通过组合正演过程中计算的各节点电位值,形成电位对模型电导率的偏导数,再按电极排列装置合成视电阻率对模型电导率的偏导数,这样可以大大缩短形成雅克比矩阵的过程,节约计算时间。该矩阵常常不对称,求解时采用了奇异值分解的方法。为了抑制病态的奇异值,需要增加一个阻尼系数,以便使反演过程稳定收敛。模型计算表明,三维反演思路和过程是正确的,而且对于低阻体反演的结果好于高阻体。但是,总体而言,三维反演的效果还不是很理想,还需要继续优化算法,提高反演成像的质量。

本文在第五章总结了研究中的一些主要成果,并对今后进一步优化完善提出了建议。主要的创新点在于:

- (1) 推导了起伏地形三维有限单元中三棱柱单元三线性插值函数;
- (2) 编制了一套模拟三维起伏地形条件下各种排列装置的视电阻率算法程序,并采用了一些措施,大大提高了计算效率;
- (3) 推导出含有地形信息的雅克比矩阵,实现了起伏地形三维反演成像算法;
- (4) 计算分析了各种复杂地形的视电阻率异常,证明正演程序适应各种地形条件。

2. 期刊论文 [黄俊革, 阮百尧, 鲍光淑 水下直流电阻率法数值模拟 -物探勘探计算技术](#)2004, 26(2)

利用有限单元法对水下电阻率测深进行数值模拟。与地面测量不同的是,水下电极所处的深度、水体本身和水底地形都会给电阻率数据造成较大影响,给数据的解释带来困难。若先通过计算,分析不同电阻率装置在水下测量时的视电阻率与水深的关系,再用有限单元法对水下的三维地电断面进行数值模拟,讨论水底地形对视电阻率的影响,即可用比较法消除地形影响。

3. 期刊论文 [强建科, 阮百尧, 熊彬 三维地电模型数值模拟中视电阻率真假异常特征分析 -CT理论与应用研究](#)

2002, 11(1)

本文概要介绍了三维数值模拟中双网格系统的剖分方法,并通过几种典型模型的有限单元法三维数值模拟计算(网格单元电导率分块均匀、电位三线性变化),充分揭示了对称四极电阻率测深法三维地电模型视电阻率真假异常的分布规律,分析了产生真假异常的原因,并研究了真异常的形态与引起真异常的地质体位置的关系。

4. 学位论文 [刘杰 起伏地形电阻率剖面异常研究](#) 2008

长期以来,研究起伏地形条件下的地电异常是电法勘探中一个难题,一方面是由于问题本身比较复杂,另一方面是由于不同时期科技发展水平达不到。众所周知,有限单元法适合于模拟形状不规则的模型,计算精度高,是地球物理数值模拟中较常用的方法。本文主要研究起伏地形条件下的电阻率剖面异常,采用的主要研究手段是应用有限单元法对起伏地形条件下电阻率进行正演模拟。

本文首先介绍了研究起伏地形条件下电阻率剖面异常特征的背景和意义,回顾了电法勘探地形影响问题的研究现状。然后介绍了起伏地形条件下有限单元法的计算流程,并对所采用的模拟程序进行了验证。针对山坡、山谷和山脊三种典型地形,进行了多种典型地电模型的电阻率法剖面正演模拟,并对计算出来的结果加以分析,总结了起伏地形情况下的电阻率法剖面异常分布规律,并用经典消除地形影响的方法一比值法,成功地消除了由地形引起的电阻率剖面假异常。

最后总结全文,说明了研究起伏地形条件下电阻率剖面异常对克服起伏地形的影响有一定的实际意义。

5. 会议论文 [张致付, 程志平, 阮百尧 三维直流电阻率测深曲线的近似反演](#) 2002

本文研究三维直流电阻率测深曲线的近似反演.作者将20hdy方法引入到直流电阻率对称四极测深曲线的三维有限单元法反演中.

6. 期刊论文 [程久龙, CHENG Jiu-long 全国优秀博士学位论文摘要矿山采动裂隙岩体地球物理场特征研究及工程应用 -中国矿业大学学报](#)2008, 37(6)

地下矿床开采引起采场围岩变形破坏产生采动裂隙,采动裂隙是矿山一系列灾害的根源,研究矿山采动裂隙岩体的地球物理场特征,提出可行的地球物理方法对裂隙岩体实施高精度高分辨率探测,对于防治矿山灾害发生,保障矿山安全,具有重要的理论意义和实际应用价值。本文通过理论分析、数值和物理模拟以及现场试验等技术途径,全面系统地研究了矿山采动裂隙岩体的地球物理场特征。主要研究内容、方法、结论及发现点如下:1)根据覆岩变形破坏产生冒落带和裂隙带这一特征,建立煤层开采前和开采后电性数学模型,利用高精度有限单元法进行电场数值模拟。计算结果表明:采动裂隙引起煤层上覆地层的视电阻率变化,其影响范围较实际破裂范围大得多,基本上是覆岩冒裂带范围的两倍,其视电阻率值最大影响区为冒落带,变化率可达19%;在裂隙发育带,视电阻率的变化率可达10%~12%。2)通过建立与实际采矿活动对应的相似材料物理模型,实施直流电阻率法的动态数据采集及反演计算,获得了覆岩采动裂隙的电场响应特征。选择采矿活动引起覆岩采动裂隙的4个关键时段,进行代表性的电场观测和计算分析。物理模拟结果表明:在覆岩变形破坏产生的裂隙带中,电场特征变化表现为正常场电阻率升高2~3倍;而在冒落带中,电阻率值增加4~6倍;在弯曲变形区,采动过程中电性特征有一定的变化,主要表现为电阻率值略有增大。3)利用相似材料物理模拟进行覆岩变形破坏的弹性波速度场响应特征研究,获得了覆岩采动裂隙的波场响应特征。建立与实际采矿活动对应的相似材料物理模型,进行煤层开采之前和开采之后两个不同时段时所模拟的岩层进行声波CT测量,反演计算所模拟岩层的波速场的分布。实验结果表明:在所模拟的覆岩破坏产生的裂隙带中,速度场变化表现为正常场降低约10%~20%;而在冒落带,采后很难接收到弹性波穿透的有效信号。在受开采影响但未破坏的采空边缘区,波速的升高是主要特征。4)结合含完整采空区的采区三维地震资料,全面分析了在煤层采空区、裂隙带及采动影响边界的

地震场特征. 研究表明: 对应采空区的位置, 煤层反射波消失或能量变弱, 覆岩层中出现波组零乱的反射波, 能量弱, 连续性差; 对应支撑压力区, 反射波组能量明显增强; 对应采动影响带, 包括上倾和下倾方向边界角范围内岩层的反射波能量明显减弱, 局部出现反射空白带. 根据这些特征可以划分采空区范围、采动裂隙发育高度、裂隙“天窗”、采动影响范围, 为水体下煤炭资源开采以及岩层沉陷控制提供了可靠的地质依据和监测技术. 5) 建立煤层开采前以及开采后生成离层(离层充水、离层充气)的波场数学模型, 利用有限差分法进行波场数值模拟. 结合现场利用地震技术探测离层层位, 分析了离层发育的具体位置及注浆充填离层带的效果, 理论与实际相结合, 并经实际检测. 6) 结合煤层开采底板岩体采动裂隙的动态弹性波CT现场实测试验, 研究采动过程中采动裂隙产生过程与弹性波场的响应关系. 探讨了动态探测方法的观测方案, 确定关键观测时段和观测系统, 根据CT反演的速度场特征, 全面分析了底板岩体产生采动裂隙的速度场响应特征, 在此基础上确定底板破坏裂隙最大发育深度, 探测效果明显, 为承压水上安全开采底板破坏监测提供了新的技术途径和地质保障. 7) 综合分析采动裂隙岩体的电性特征和波场特征, 结合现场试验的结论和效果分析, 提出了采动裂隙岩体地球物理方法监测初步技术体系.

7. 学位论文 [黄俊革 坑道内三维电阻率全空间立体成像及电阻率法研究](#) 2006

在坑道内进行电阻率测深时, 坑道空间狭小, 测量剖面的布设受到局限. 相应地, 采用地表电阻率法测线布设方法对周边介质的全空间探测难以得到满意效果. 例如, 在坑道底面布设测线, 其异常响应不仅仅是底面下方地质体的反映, 坑道外测其他位置的地质体同样在底面剖面上有所反映, 异常判别困难. 为此, 可利用坑道的四个面和四个角同时进行测量.

由于坑道内电场空间分布的特殊性, 各种电阻率观测装置的异常响应与地表异常形态完全不同. 本文对小极距偶极—偶极、大极距偶极—偶极装置、赤道偶极装置进行正演模拟, 分析各个断面的异常特征.

坑道内的电阻率异常响应, 由于受到坑道空腔的影响, 很难得到解析解. 正演一般采用物理或数值计算手段进行模拟, 在分析异常规律的同时, 为坑道全空间反演做准备. 首先给出坑道中正常电位的取值, 并利用有限单元异常电位算法对坑道内电阻率测深进行正演计算.

在坑道正演的前提下, 利用点源互换原理计算雅可比矩阵, 可在一次正演的基础上得到所有矩阵元素, 节约了计算时间. 利用最小二乘法对坑道周边介质进行全空间反演成像.

煤矿和金属矿山坑道、公路铁路隧道、引水隧道等地下工程中, 巷道前方隐伏导、含水地质构造、溶洞一直是困扰安全生产的重大隐患. 用钻探方法进行超前探, 设备笨重、工期长、效率低, 且破坏隔水层, 直接揭露构造体, 造成人为的突水通道, 形成新的不安全因素. 近年来多采用地球物理手段进行探测, 如地震、地质雷达、直流电阻率法、TEM法 $\angle 1^\circ$ 等方法. 其中直流电阻率法投入少、效率高被广泛使用.

本文首先以无限大板状体为例求解全空间电场分布, 提出探厚比概念以讨论电阻率超前探测极限问题. 通过对比全空间与坑道内超前探测异常形态可知, 坑道坑道空腔只会影响极距较小时的视电阻率幅值, 不会掩盖迎头前方地质体的异常响应. 大量模型计算结果表明, 电阻率异常极值位置与板状体位置之间的差异在5~10倍之间, 且同时受到异常体厚度和电性以及板状体倾角的影响. 仅利用电阻率极值位置准确解释超前探测异常的难度较大. 设计有效的反演方法对异常体的各种参数综合反演是非常必要的. 首先利用有限元数值模拟技术分析并消除坑道空腔对视电阻率的影响, 并将坑道超前探测视电阻率曲线转化为全空间视电阻率曲线. 然后采用最小二乘法对超前探测视电阻率曲线进行快速反演. 反演结果可准确反映围岩电阻率、异常体的电性、位置和产状; 而由于同层等值现象, 反演结果只能确定异常体的厚度和电阻率的组合值.

目前, 电阻率法在找矿、工程勘察、水文地质调查中的应用非常广泛. 但对异常特征、规律的理论问题缺乏深入研究. 本文利用有限单元法对三维高密度E-scan法、水下电阻率/极化率测深、井地联合观测方式下的异常进行正演模拟, 以分析其异常特征.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dqwlxjz200903031.aspx

授权使用: 中南大学(zndx), 授权号: 566bbb33-286f-4620-a45a-9e5700b37117

下载时间: 2010年12月25日