

起伏地形下时间域激发极化法三维非结构有限元数值模拟

黄 渡, 吴小平

(1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院地震与地球内部物理实验室, 安徽合肥 230026;

2. 蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 安徽蒙城 233500)

摘要: 一般认为,起伏地形对激发极化法勘探影响不大,这是因为在地下介质极化率均匀的理想情况下起伏地形没有影响.当存在矿体的复杂介质模型时,起伏地形对激发极化法预期会存在一定影响.因为起伏地形的模拟,特别是对于三维模型具有较大的挑战性,所以目前还缺乏地形影响的量化研究.本文实现了时间域激发极化三维非结构有限元数值模拟,由于采用了非结构网格剖分,特别适合任意起伏地形三维地电模型的数值模拟及其对激发极化影响的研究.在此基础上本研究对起伏地形下的板状、球状异常体进行了三维激发极化数值模拟,探讨了起伏地形对激发极化响应的影响.研究表明:非对称地形会使激发极化法的激电异常中心位置发生偏离,斜坡坡度越大异常的中心位置偏离越大,而且异常幅值也减小;地形影响的幅度与极化异常体非对称性存在关联性.

关键词: 激发极化法;起伏地形;等效电阻率;有限元;非结构;三维正演

中图分类号: P631.3 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2020.05.019

引用格式: 黄渡,吴小平.起伏地形下时间域激发极化法三维非结构有限元数值模拟[J].中国科学技术大学学报,2020,50(5):705-714.

HUANG Du, WU Xiaoping. 3D time-domain IP forward modeling using unstructured finite element method under uneven terrain[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2020, 50(5):705-714.

3D time-domain IP forward modeling using unstructured finite element method under uneven terrain

HUANG Du, WU Xiaoping

(1. Laboratory of Seismology and Physics of Earth's Interior, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. National Geophysical Observatory at Mengcheng, Mengcheng 233500, China)

Abstract: It is generally believed that the undulating terrain has little influence on the induced polarization (IP) exploration, because it has no influence under the relatively ideal condition of uniform polarization of the underground medium. However, for the complex medium model with ore body under the condition of undulating terrain, the terrain will certainly have an impact on the induced polarization method. There have been very few studies on the quantitative characterization of terrain effect on the induced polarization method, mainly because the undulating terrain is not easy to simulate, especially for the three-dimensional model. In this paper, the three-dimensional unstructured finite element numerical simulation of induced

收稿日期: 2019-08-26; **修回日期:** 2020-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(41874084, U2039206)和国家重点研发计划项目(2018YFE0208300, 2018YFC0603500)资助.

作者简介: 黄渡,男,1994年生,硕士.研究方向:直流电法. E-mail: huangdu@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 吴小平,博士/教授. E-mail: wxp@ustc.edu.cn

polarization is developed. The unstructured mesh is particularly suitable for the numerical simulation of three-dimensional geoelectric model under arbitrary undulating terrain and the study of its influence on induced polarization. With the newly developed method, the three-dimensional induced polarization numerical simulation for plate-shaped and spherical anomaly bodies in rolling terrain is carried out, and the influence of rolling terrain on induced polarization response is discussed. The results show that the asymmetric topography will make the center position of IP anomaly deviate. The larger the slope gradient is, the larger the deviation will be, and the IP amplitude becomes smaller with increasing slope gradient. The asymmetry of polarization anomaly also plays an important role in the topography impact for its IP response.

Key words: induced polarization method; uneven terrain; equivalent resistivity; finite element method; unstructured; 3D forward modeling

0 引言

在人工电场激发下,一些岩、矿石由于电化学作用形成面电荷和体电荷,产生随时间变化的二次场,这种物理化学作用称为激发极化效应^[1]. 20 世纪 20 年代, Schlumberger 首先发现这一现象并应用于金属硫化物矿体勘探,目前激发极化已成为金属矿勘探必不可少的勘探方法,在水文地质、工程地质、环境、考古等诸多探测领域也获得广泛应用^[2].

理论上,简单的电模型激发极化(IP)法基本不受起伏地形的影响^[3-5]. 但是,在激发极化法野外找矿的实践中,根据视极化率断面图的结果布设钻孔进行验证,钻孔常常偏离矿体位置,使得钻探深度远远超过了预计深度而不能见矿^[6]. 为克服和改善这一现象,起伏地形条件下激发极化三维数值模拟研究非常必要. Coggon^[7]于 20 世纪 70 年代实现了电阻率二维有限元数值模拟研究. 徐世浙^[8]系统介绍了有限单元法在地球物理数值模拟中的应用. 阮百尧等^[9]实现了电导率分块均匀模型的电测深三维有限元数值模拟. 熊彬等^[10]基于六面体单元实现了电导率连续变化模型的电阻率三维数值模拟. 吴小平等^[11]基于不完全 Cholesky 分解的共轭梯度法,实现了电阻率三维有限元数值模拟的快速计算. 吕玉增等^[12]和李勇等^[13]基于四面体单元剖分的有限单元法,研究了起伏地形对电阻率三维数值模拟结果的影响. 以上的电阻率有限元数值模拟均是利用结构化的网格剖分. Blome 等^[14]强调了非结构有限单元法的优势,由于非结构网格剖分能够在重点计算区域进行局部加密,因而电阻率三维非结构有限元数值模拟在大幅提高求解精度的同时,还能大大提高计算效率. Ren 等^[15]实现了自适应非结构电阻率

有限元三维数值模拟,能够模拟计算任意起伏地形条件下复杂地下结构模型的地电响应. Wang 等^[16]进一步研究了基于非结构网格的电阻率任意各向异性三维有限单元正演数值模拟. 在起伏地形对激发极化影响的研究中,麻昌英等^[17]完成了激发极化 2.5 维有限元正演模拟,并研究了山谷和山脊地形对极化率观测的影响. 陈进超等^[18]实现了激发极化法非结构化三角网格有限元 2.5 维正演模拟,结果表明非结构网格剖分能较准确地模拟二维起伏地形以及模型中复杂地质体边界,增强计算网格的适应能力,提高网格质量和模拟精度. 林家勇等^[19]利用三维结构化有限单元数值模拟研究了山谷地形对激发极化法的影响.

综上所述,由于起伏地形对电阻率方法影响非常大,所以考虑起伏地形的电阻率三维非结构有限元模拟已有不少相关研究工作. 但起伏地形对激发极化法勘探的影响没有引起足够的重视,相关工作基本限于 2.5 维或结构化三维有限元数值模拟,因此难以获得实际复杂条件下地形对激发极化法勘探较准确的影响. 因此,本文在实现任意起伏地形下激发极化三维非结构有限元数值模拟的基础上,探讨了起伏地形对复杂模型激发极化响应的影响.

1 有限元理论基础

1.1 控制方程

导电介质中的稳定电流场遵循欧姆定律,其微分形式为

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (1)$$

式中, \mathbf{j} 是电流密度矢量, σ 是电导率, \mathbf{E} 是电场强度矢量.

稳定电流场也遵循电荷守恒定律,不包含电流

源的闭合面电流通量为零,包含电流源的闭合面电流通量为电流源电流大小,如式(2)所示:

$$\oiint_{\Gamma} \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = \begin{cases} 0, A \notin \Gamma \\ I, A \in \Gamma \end{cases} \quad (2)$$

式中: Γ 是闭合面, A 是电流源, I 是电流源电流大小.

对于单个点电源 A 在地表供电的半空间介质情况,根据高斯公式,式(2)可转换为散度形式,如下式:

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 2I\delta(A) \quad (3)$$

式中, $\delta(A)$ 是以 A 点为中心的狄拉克函数.

稳定电流场的电场强度与电位的关系如式(4)所示:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (4)$$

式中, V 是电位.

联立式(1)(3)(4)得点电源电位控制方程,如式(5)所示:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = -2I\delta(A) \quad (5)$$

1.2 边值问题

为了求解位场问题,需要考虑所研究区域的边值条件.研究区域边值条件可分为三类:第一类是内边界,即在所研究区域内,两种具有不同电阻率的介质交界处;第二类是地表边界;第三类是地下侧边界和底面边界,由于实际正演时会把它们设立的离电流源很远,所以可视为无穷远边界.

第一类边界内边界,在边界处电位和电流密度法向分量具有连续性,如式(6)所示.内边界条件为自然边界条件,可在泛函求极值过程中自动满足,可以不考虑.

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_2 \\ \sigma_1 \frac{\partial V_1}{\partial n} &= \sigma_2 \frac{\partial V_2}{\partial n} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: V_1 和 V_2 分别是两种不同介质中分界面上同一点的电位, σ_1 和 σ_2 分别是两种不同介质的电导率, n 是分界面的法向量.

第二类边界地表边界,电流沿地表流动,地表法方向的电流密度分量为零,如式(7)所示:

$$\left. \frac{\partial V}{\partial n} \right|_{\Gamma_1} = 0 \quad (7)$$

式中, Γ_1 是研究区域地表, n 是地表法方向, V 是电位.

第三类边界地下侧边界和底面边界,由于设立的离电流源很远,可以认为研究区域内部的电性不均匀性对第三类边界上的电位分布不发生影响,其

电位是均匀半空间点电源电位,如式(8)所示,式(9)与其等价:

$$V \Big|_{\Gamma_2} = \frac{I}{2\pi\sigma R_A} \quad (8)$$

式中, Γ_2 是地下侧边界和底面边界, σ 是边界上电导率, R_A 是电流源到边界的距离.

$$\left(\frac{\partial V}{\partial n} + \frac{\cos(R_A, n)}{R_A} V \right) \Big|_{\Gamma_2} = 0 \quad (9)$$

式中: $\cos(R_A, n)$ 是电流源到边界上一点的位矢与边界上该点法方向夹角的余弦.

因此,直流电场三维数值模拟的控制方程和边界条件分别是式(5)、式(7)和式(9).

1.3 变分问题

式(5)、式(7)和式(9)可转换为等价的变分问题^[21],如式(10)所示:

$$F(V) = \iiint_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \sigma (\nabla V)^2 - 2I\delta(A)V \right] d\Omega + \frac{1}{2} \iint_{\Gamma_2} \sigma \frac{\cos(R_A, n)}{R_A} V^2 d\Gamma, \delta F(v) = 0 \quad (10)$$

式中, Ω 是研究区域, Γ_2 是研究区域的地下侧边界和底面边界.

将泛函(10)离散得到离散泛函,如式(11)所示:

$$F(V) = \frac{1}{2} \sum_{e=1}^{N_e} \iiint_{\Omega_e} \sigma (\nabla V)^2 d\Omega - 2I\delta(A)V + \frac{1}{2} \sum_{\Gamma_2} \iint_{\Gamma_2} \sigma \frac{\cos(R_A, n)}{R_A} V^2 d\Gamma \quad (11)$$

式中, N_e 是研究区域内单元个数, Ω_e 为单元体.

单元内节点以外的电位使用线性插值得到,如式(12)所示:

$$V = N^T V_e = V_e^T N \quad (12)$$

式中, N 为形函数, V_e 是单元节点上的电位.

将线性插值公式(12)代入离散泛函公式(11)中,化简后如式(13)所示:

$$F(v) = \frac{1}{2} \sum_{e=1}^{N_e} V_e^T K_e^1 V_e - I v(A) + \frac{1}{2} \sum_{\Gamma_2} V_e^T K_e^2 V_e \quad (13)$$

式中, K_e^1 是体单元矩阵, K_e^2 是面单元矩阵.

公式(13)继续相加,各体单元矩阵 K_e^1 合成为整体矩阵 $\overline{K^1}$,各面单元矩阵 K_e^2 合成为整体矩阵 $\overline{K^2}$,如式(14)所示:

$$F(v) = \frac{1}{2}V^T \overline{K_e^1} V + \frac{1}{2}V^T \overline{K_e^2} V - V^T P \quad (14)$$

式中, V 是全部节点的电位值, P 是点电源分布向量。

公式(14)进一步合成,令泛函数变分为零,得到式(15):

$$KV = P \quad (15)$$

本文采用 CRS(compressed row storage)方式存储稀疏矩阵以节约空间,使用不完全 Cholesky 共轭梯度法求解式(15)大型线性方程组获得所有网格节点上的电位值,进而计算模型的激发极化响应,相比于传统共轭梯度迭代算法,求解速度大幅度提高^[20]。

1.4 非结构化网格剖分

网格剖分方法可分为结构化网格剖分和非结构化网格剖分。结构化网格剖分对三维复杂几何模型适应性差,也难于模拟复杂起伏地形,而且结构化网格剖分不便对异常区域的网格进行局部加密,若有更高精度数值模拟要求则只能加密整行或整列的全部网格,尤其对三维有限元计算非常不利,因为其外边界设置要求离源很远。而采用非结构化网格则可以适应复杂几何模型和起伏地形,允许网格局部加密,通过少量增加网格,可大大提高三维数值模拟的精度,相比于结构化网格剖分具有很大的优势^[16]。

本文使用开源软件 TetGen 完成三维非结构网格剖分。TetGen 是一个四面体格网生成器,提供了丰富的命令满足用户对非结构网格剖分的需求,其内部算法通过质量控制因子约束四面体单元,使得剖分后的单元更接近正四面体^[22],保障了三维非结构有限元计算的稳定性。

1.5 视极化率计算

以上电阻率三维有限元数值模拟针对地下介质无激发极化效应(即介质的极化率 $\eta = 0$)的情况,计算得到的电场称为一次场 V_1 。当地下介质的极化率 $\eta \neq 0$,极化体在电流作用下产生激发极化效应,形成随时间增长的二次电场 V_2 ,二次电场与一次电场之和为极化总场 V^* 。

利用等效电阻率方法可以简单地求解极化总场 V^* ^[3],只需将计算无激发极化效应的一次电场中的地下介质电阻率 ρ_i 替换成等效电阻率 ρ_i^* :

$$\rho_i^* = \frac{\rho_i}{1 - \eta_i} \quad (16)$$

式中, ρ_i 是各地质体电阻率, η_i 是该地质体的极化率, ρ_i^* 则是该地质体的等效电阻率。然后对替换后的地电模型再进行一次电阻率三维非结构有限元计

算,得到的电位分布就是极化总场 V^* 。最后获得三维模型激发极化响应,即视极化率 η_s 为

$$\eta_s = \frac{V_2}{V^*} \times 100\% = \frac{V^* - V_1}{V^*} \times 100\% \quad (17)$$

因此,利用等效电阻率方法,只需进行两次电阻率三维有限元计算就可以获得模型的激发极化响应 η_s 。

2 程序验证

为了验证本文三维直流电阻率/激发极化非结构有限元正演模拟程序的可靠性,本文设计了两个有解析解的地电模型,将两个模型的三维有限元计算结果与解析解比较,并给出计算的相对误差,以验证三维有限元计算的准确性。

2.1 三层电阻率模型

如图 1(a)为一个三层地电模型。其第一层电阻率 $1\,000\ \Omega \cdot \text{m}$,厚度 $20\ \text{m}$;第二层电阻率 $100\ \Omega \cdot \text{m}$,厚度 $180\ \text{m}$;第三层电阻率 $10\ \Omega \cdot \text{m}$ 。采用三极电测深装置进行模拟测量,供电电流 $1\ \text{A}$,测量电极 M 和 N 极距为 $4\ \text{m}$,在长 $2\,000\ \text{m}$ 的测线上移动,供电电极 A 与测量电极 M 和 N 中点 O 的最小距离为 $5\ \text{m}$,最大距离为 $2\,000\ \text{m}$ 。

电阻率三维有限元数值模拟的电测深结果及其与理论解析解的比较如图 1(b)所示,图 1(c)显示了模拟结果与解析解对比的相对误差。可以看出,数值模拟获得的电测深曲线与解析解的理论电测深曲线吻合一致,相对误差均小于 1% ,表明三维有限元数值模拟计算精度很高。

2.2 起伏地形均匀介质模型

山谷与山峰相连的三维起伏地形下为均匀半空间介质模型,其电阻率为 $100\ \Omega \cdot \text{m}$,极化率为 5% 。起伏地形的高程 z 用式(18)表示:

$$z = \begin{cases} 100 \times \left(\frac{y+500}{250}\right) \times \sin\left(\frac{\pi x}{250}\right), & x \in [-250, 250], y \in [-500, -250]; \\ 100 \times \sin\left(\frac{\pi x}{250}\right), & x \in [-250, 250], y \in [-250, 250]; \\ 100 \times \left(\frac{500-y}{250}\right) \times \sin\left(\frac{\pi x}{250}\right), & x \in [-250, 250], y \in (250, 500]; \\ 0, & x \notin [-250, 250] \text{ 或 } y \notin [-500, 500] \end{cases} \quad (18)$$

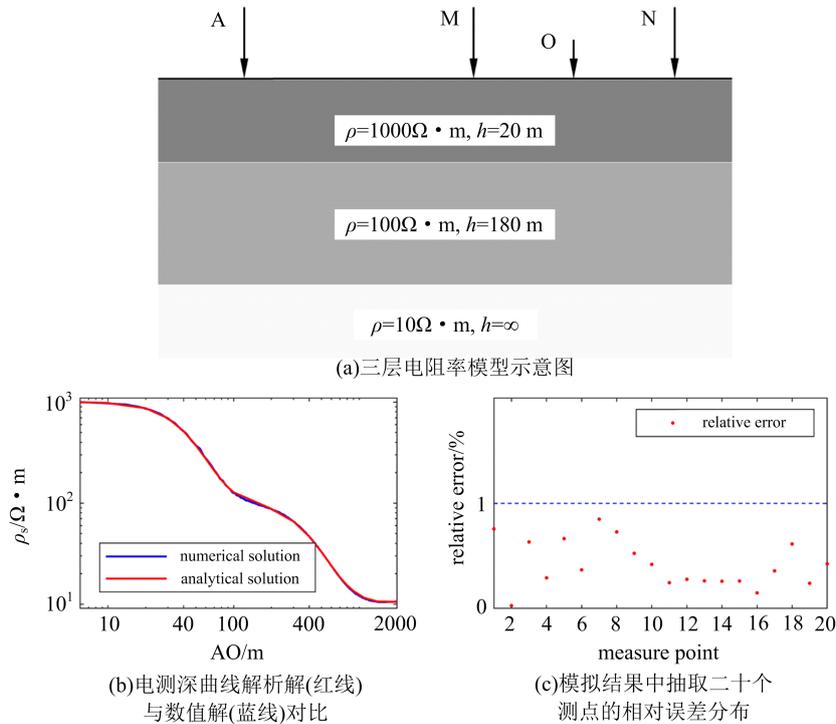


图 1 三层电测深模型及其电阻率三维数值模拟结果

Fig. 1 3-layer resistivity model and its 3D resistivity forward modeling result

式中,山峰最高点和山谷最低点与水平地面相对高度均为 100m,山谷和山峰的水平跨度均为 250m,起伏地形的地表建模及其非结构网格剖分俯视图如图 2(a)所示.采用对称四极装置进行测量,供电电流 1A,测量电极 M 和 N 极距 10m,供电电极 A 和 B 最小极距 20m,最大极距 500m,测点点距 5m,电阻率三维有限元正演模拟结果如图 2(b)所示,激发极化三维有限元正演计算结果如图 2(c)所示.

纯地形模型的激发极化响应有解析解,即其全域计算的视极化率等于介质真极化率 5%.图 2(c)所示的视极化率三维正演模拟结果与解析结果是一致的,相对误差均小于 1%.而纯地形模型的电阻率测量没有解析解,但图 2(b)所示的电阻率三维有限元正演模拟结果在山谷地形下呈现高阻异常,山峰地形下呈现低阻异常,与已有地形影响的结果一致^[12-22].可见,纯起伏地形对电阻率法勘探产生极大影响,但对激发极化法没有影响,计算结果均与电法勘探理论相吻合^[3].

3 激发极化法地形影响

本文设计了斜坡与平地组合地形,研究球状异常体、左倾斜板状异常体、竖直板状异常体和右倾斜

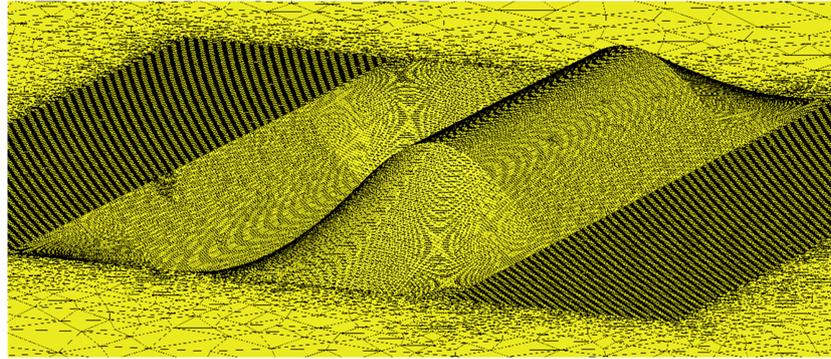
板状异常体在斜坡坡度 α 分别为 0° 、 30° 、 45° 和 60° 条件下的激发极化法结果的变化,探讨起伏地形对激发极化法结果的影响.

图 3 为斜坡与平地组合地形模型示意图.斜坡与平地组合地形下的不同形状异常体模型非结构化网格剖分如图 4 所示,其中图 4(a)、4(b)、4(c)和 4(d)分别显示球体、左倾斜板体、竖直板体和右倾斜板体在 30° 斜坡倾角下的非结构网格剖分结果.网格在异常体区域以及电流源、异常体界面附件、起伏地形界面附近区域均进行了局部节点加密,以提高三维有限元正演数值模拟的计算精度,这是结构化网格剖分难以实现的.以下均采用对称四极装置测量,与节 2.2 中起伏地形均匀介质模型所采用的测量装置相同.

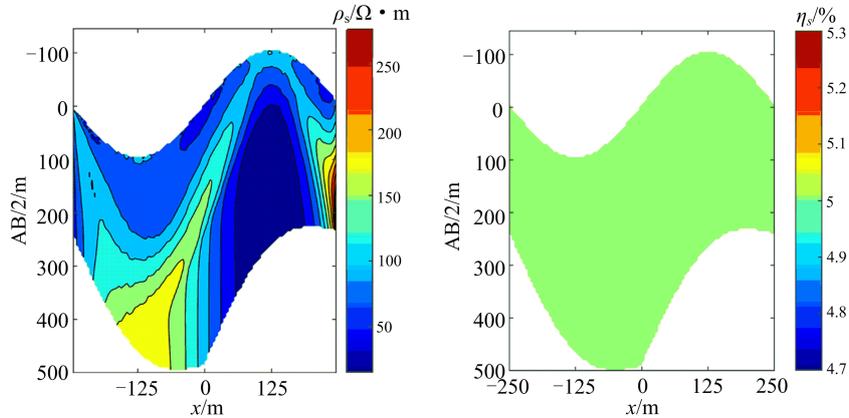
3.1 球体异常模型

水平均匀半空间下,背景电阻率 $100 \Omega \cdot m$,背景极化率 1%.存在一个电阻率 $100 \Omega \cdot m$,极化率 20%,半径为 50 m 的球状极化异常体.异常体顶部埋深 80 m,用对称四极装置进行断面测量,测点点距 5m,视极化率正演结果如图 5(a)所示.

30° 斜坡与平地组合地形下,背景电阻率 $100 \Omega \cdot m$ 、极化率 1%,球状极化异常体各参数同上.异



(a)起伏地形模型地表建模及非结构网格俯视图



(b)起伏纯地形下视电阻率断面图

(c)起伏纯地形下视极化率断面图

图 2 起伏地形模型及其电阻率、激发极化三维数值模拟结果

Fig. 2 Uneven terrain model and its 3D resistivity and IP forward modeling results

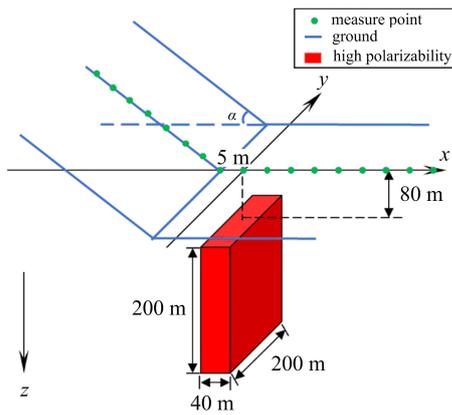


图 3 斜坡与平地组合地形模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram for slope and flat ground model

常体顶部埋深 80m,球心在平地下,与起伏地形拐点水平距离为 5m. 其对称四极装置测量的视极化率有限元正演结果如图 5(b)所示.

45°和 60°斜坡与平地组合地形下,相同球状异常体模型的视极化率有限元正演结果如图 5(c)和图 5(d)所示.

3.2 板状异常体模型

水平均匀半空间下,背景电阻率 $100 \Omega \cdot m$,背景极化率 1%. 存在一个电阻率 $100 \Omega \cdot m$,极化率 20%,尺寸 $200m \times 40m \times 200m$ 的左倾斜板状极化异常体. 异常体顶部埋深 80m,用对称四极装置进行断面测量,测点点距 5m,视极化率有限元三维正演结果如图 6(a)所示.

30°斜坡与平地组合地形下,背景电阻率 $100 \Omega \cdot m$,背景极化率 1%. 存在一个电阻率 $100 \Omega \cdot m$,极化率 20%,大小 $200m \times 40m \times 200m$ 的左倾斜板状极化异常体. 异常体顶部埋深 80m,异常体顶部中心在平地下,与拐点水平距离为 5m. 其对称四极装置三维有限元视极化率正演结果如图 6(b)所示.

45°和 60°斜坡与平地组合地形下,相同左倾斜板状异常体模型的视极化率有限元正演结果如图 6(c)、6(d)所示.

斜坡与平地组合地形下,竖直板状异常体模型和右倾斜板状异常体在不同斜坡倾角的视极化率有

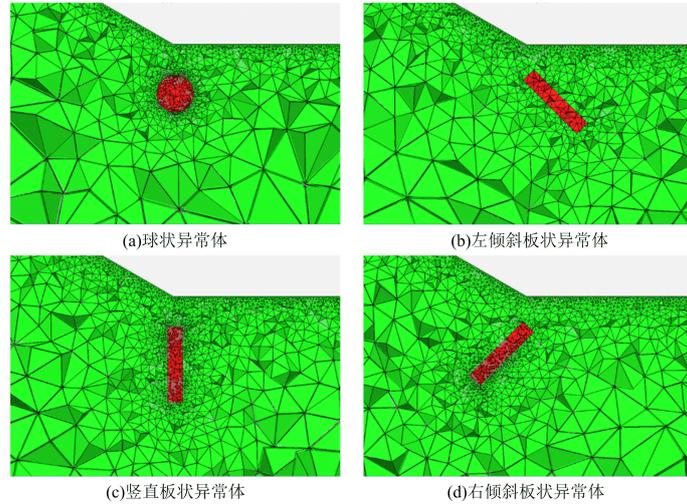


图 4 斜坡与平地组合地形下各异常体在 30° 斜坡倾角的非结构网格剖分图
 Fig. 4 unstructured mesh of different anomalies under 30° angle slopes and flat ground

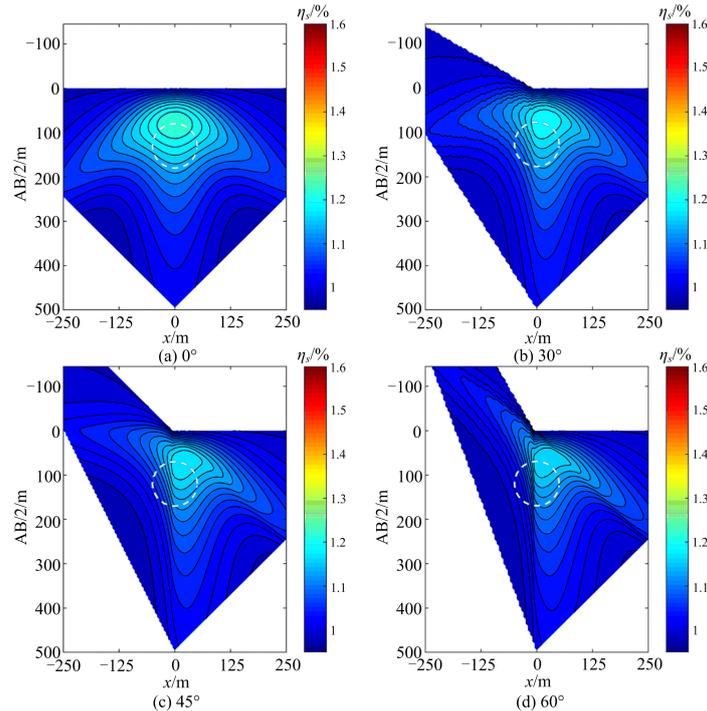


图 5 斜坡与平地组合地形下球状异常体在不同斜坡倾角的视极化率断面图

Fig. 5 Cross-section of apparent chargeability for spherical anomaly under different slopes with respect to flat ground

限元正演结果分别如图 7(a)、7(b)、7(c)、7(d) 和图 8(a)、8(b)、8(c)、8(d) 所示。

3.3 不同形态异常体地形影响对比分析

在平坦地形情况下,对比图 5(a)、6(a)、7(a) 和 8(a) 不同形态极化异常体的视极化率断面图可见,水平方向对称的球体、竖直板体模型的视极化率断面图 5(a)、7(a) 均比较对称,而不对称的左倾斜板

体和右倾斜板体的视极化率断面图 6(a) 和 8(a) 也反映了异常体的倾斜方向. 因此,在没有地形起伏的情况下,激电响应可以比较准确地反映地下极化异常体的位置。

在图 5、图 6、图 7 和图 8 中,进一步观察同一形态极化异常体在不同斜坡倾角地形下的视极化率断面图可以发现,随着斜坡坡度 α 从 0°、30°、45° 变化

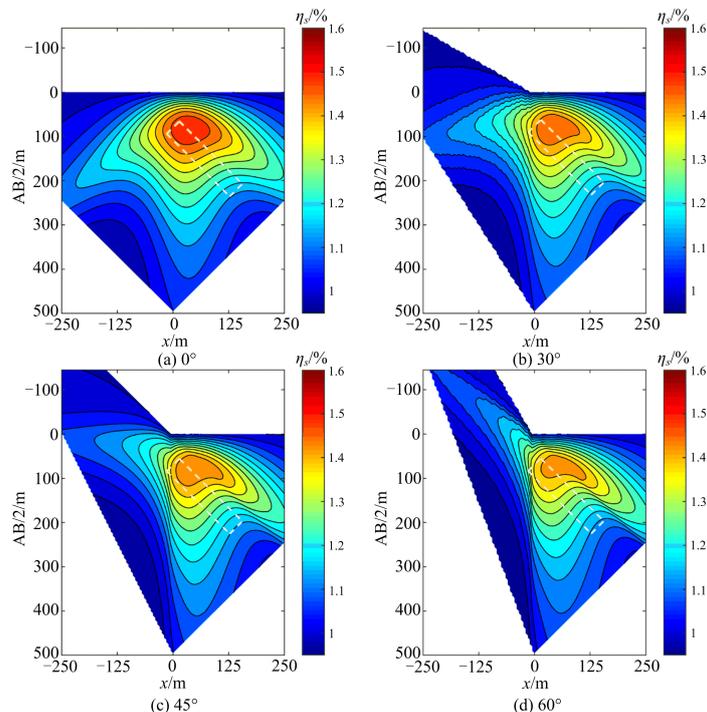


图 6 斜坡与平地组合地形下左倾斜板状异常体在不同斜坡倾角的视极化率断面图

Fig. 6 Cross-section of apparent chargeability for left tilting plate anomaly under different slopes with respect to flat ground

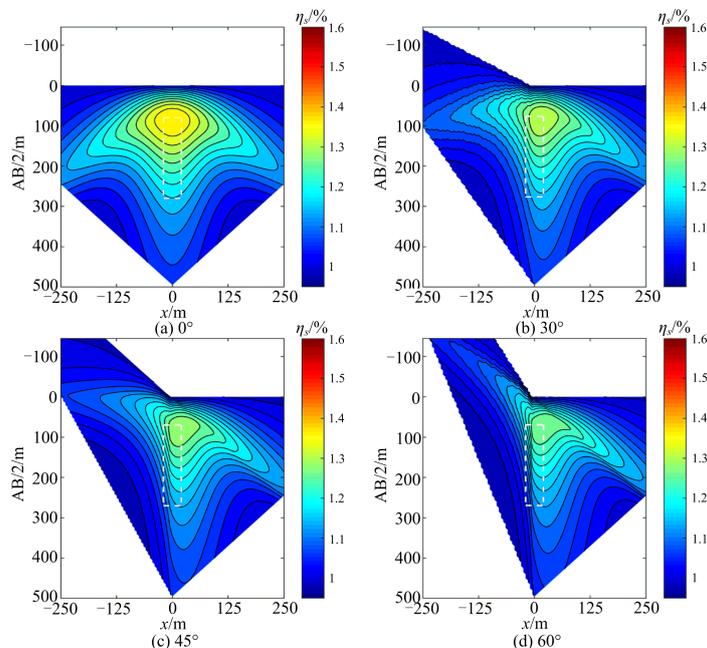


图 7 斜坡与平地组合地形下竖直板状异常体在不同斜坡倾角的视极化率断面图

Fig. 7 Cross-section of apparent chargeability for vertical plate anomaly under different slopes with respect to flat ground

到 60° , 视极化率异常区域形态发生畸变越发明显, 激电响应异常随斜坡坡度的增大均有向远离斜坡方向偏离的趋势, 而且激电响应的异常幅值也随斜坡

坡度的增大而减小。

为直观起见, 这里选取电极距 $AB/2=100$ m 能反映较大异常的探测深度剖面, 四种不同形态极化

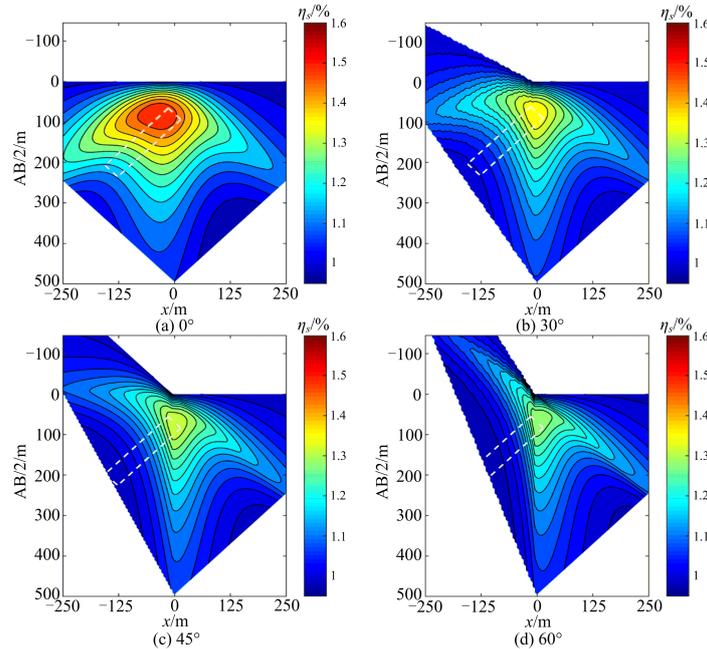


图 8 斜坡与平地组合地形下右倾斜板状异常体在不同斜坡倾角的视极化率断面图

Fig. 8 Cross-section of apparent chargeability for right tilting plate anomaly under different slopes with respect to flat ground

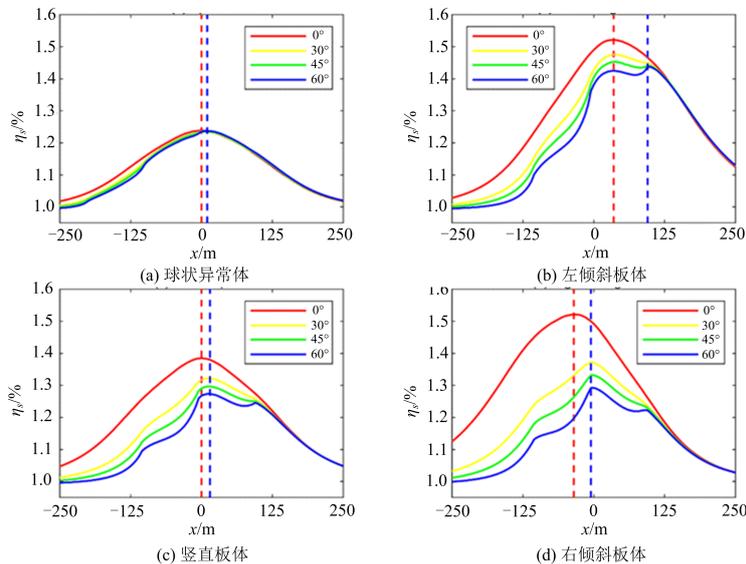


图 9 斜坡与平地组合地形下各异常体在不同斜坡倾角的视极化率剖面对比 (AB/2=100 m)

Fig. 9 Comparison for apparent chargeability profiles of different anomalies under different slopes with respect to flat ground (AB/2=100 m)

异常体的响应在该电极距下随斜坡坡度 α 从 0° 、 30° 、 45° 变化到 60° 的视极化率剖面曲线见图 9。图 9 (a)、9(b)、9(c) 和 9(d) 分别是球状极化异常体、左倾斜板状极化异常体、竖直板状极化异常体和右倾斜板状极化异常体的视极化率剖面曲线对比图，并特别用两条垂直虚线标示了各形态极化异常体在斜

坡坡度 α 为 0° 和 60° 时的视极化率剖面曲线最大值位置，球体、左倾斜板体、竖直板体和右倾斜板体的视极化率曲线最大值位置分别向远离斜坡方向水平偏离 10 m、60 m、15 m 和 30 m。对于顶部埋深 80 m 的矿体而言，其激电异常水平偏离十几米或可接受，但偏离 30 m 就有可能导致布置钻探失误，而偏离 60

m 基本是不可接受的. 同时可见, 越对称的异常体其激电响应偏离越小, 三轴对称的球体偏离 10m, 水平对称的竖直板体偏离 15m; 而水平方向不对称的倾斜板体, 其激电异常偏离严重, 尤其当板体的倾斜方向与地形一致时, 偏离最大.

4 结论

(I) 基于非结构网格剖分的电阻率三维有限单元数值模拟算法, 结合等效电阻率法, 实现了任意起伏地形下激发极化法三维非结构有限元数值模拟, 两个模型的三维有限元计算结果与其解析解均吻合一致, 验证了算法的准确性、可靠性. 同时, 非结构网格剖分技术特别适合任意起伏地形三维地电模型的数值模拟, 是本文研究激发极化地形影响的关键.

(II) 同一形态极化异常体在不同斜坡地形下的视极化率响应随斜坡坡度增大, 异常区域形态发生畸变越明显. 激电响应异常随斜坡坡度的增大均有向远离斜坡方向偏离的趋势, 坡度越大, 异常偏离越大. 而且, 激电响应异常的幅值也随斜坡坡度的增大而减小.

(III) 相同起伏地形条件下, 不同形态异常体激电响应的地形影响差异明显. 越对称的异常体其激电响应偏离越小, 而水平方向不对称的倾斜板体激电异常偏离严重, 尤其当板体的倾斜方向与地形一致时偏离最大. 例如对于顶部埋深 80 m 的左倾斜板体, 在 60°斜坡下其激电异常水平偏离达 60 m.

在实际金属矿勘探中, 起伏地形是不可避免的, 而且特定地形情况下有可能对激发极化法产生较大影响. 因此, 本文激发极化法的地形影响特征研究对矿产勘探开发有重要的实际应用价值.

参考文献(References)

- [1] 张胜业, 潘玉玲. 应用地球物理学原理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2004: 4.
- [2] 李长伟. 井中激发极化法正反演及快速迭代求解技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [3] 傅良魁. 电法勘探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1983.
- [4] 曾勇. 激电测深在新疆且末琪玉坡的应用研究[J]. 新疆有色金属, 2009, 32(S1): 14-15.
- [5] 杨华, 李金铭. 起伏地形对近矿围岩充电法影响规律的数值模拟研究[J]. 物探与化探, 1999(3): 43-51+56.
- [6] 吴小平. 单斜坡地形条件对激电对称四极测深拟断面图的影响[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2166-2171.
- [7] COGGON J H. Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method[J]. Geophysics, 1971, 36(2): 132-151.
- [8] 徐世浙. 地球物理中的有限单元法[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 12.
- [9] 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——中国地质大学学报, 2001, 26(1): 73-77.
- [10] 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[J]. 地球物理学报, 2002, 45(1): 131-138.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(3): 1039-1046.
- [14] BLOME M, MAURER H R, SCHMIDT K. Advances in three-dimensional geoelectric forward solver techniques [J]. Geophysical Journal International, 2009, 176 (3): 740-752.
- [15] Ren Z Y, Tang J T. 3D direct current resistivity modeling with unstructured mesh by adaptive finite-element method [J]. Geophysics, 2010, 75(1): H7-H17.
- [16] WANG W, WU X P, SPITZER K. Three-dimensional DC anisotropic resistivity modelling using finite elements on unstructured grids [J]. Geophysical Journal International, 2013, 193(2): 734-746.
- [17] 麻昌英, 柳建新, 刘海飞, 等. 复杂地形下高密度激电法 2.5 维有限单元法数值模拟[J]. 物探化探计算技术, 2014, 36(4): 405-409.
- [18] 陈进超, 王绪本, 王丽坤. 时间域激发极化法非结构化三角网格有限元正演模拟[J]. 物探化探计算技术, 2011, 33(4): 411-417, 347.
- [19] 林家勇, 汤井田, 丁茂斌, 等. 复杂地形条件下激发极化有限单元法三维数值模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(5): 1183-1187.
- [20] 吴小平, 徐果明, 李时灿. 利用不完全 Cholesky 共轭梯度法求解点源三维地电场[J]. 地球物理学报, 1998, 41(6): 848-855.
- [21] CIARLETP G. The finite element method for elliptic problems[M]. Philadelphia, PA, USA: SIAM, 2002.
- [22] SI H. TetGen, a Delaunay-based quality tetrahedral mesh generator [J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2015, 41(2): 11; doi: 10.1145/2629697.