

闫永利, 赵永贵, 陈本池等. 二次电流场多次叠加概率成像. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1544~1550

Yan Y L, Zhao Y G, Chen B C, et al. Multiple superimposed tomography of probability on second electrical field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(5): 1544~1550

二次电流场多次叠加概率成像

闫永利¹, 赵永贵¹, 陈本池², 陈 赞¹, 马晓冰¹, 孔祥儒¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2 中国石油石化总公司技术部, 北京 100029

摘 要 基于地下电流场的积分公式, 离散化的二次电流场被分解为电性不连续界面上的一系列点电荷电场的代数和. 单位正点电荷电场被引入作为空间扫描函数(SDS), 积累电荷出现的概率(COP)函数定义为二次电流场与 SDS 的互相关. 为对概率成像结果进行定量分析解释, 提出了规范的积累电荷出现的概率(NCOP)函数. 通过应用有限元算法对 2D 地电模型进行二次电流场合成, 实现了二次电流场的多次叠加概率成像. 结果表明对均匀半空间中赋存地质异常体的电性结构, 概率成像方法对地下异常体的空间位置有较好的指示作用.

关键词 电阻率层析成像, 二次电流场, 概率成像, 空间扫描函数, 规范的积累电荷出现的概率函数

文章编号 0001-5733(2008)05-1544-07

中图分类号 P631

收稿日期 2007-10-30, 2008-07-18 收修定稿

Multiple superimposed tomography of probability on second electrical field

YAN Yong-Li¹, ZHAO Yong-Gui¹, CHEN Ben-Chi², CHEN Yun¹,

MA Xiao-Bing¹, KONG Xiang-Ru¹

1 *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2 *Technical Department, China Petroleum and Chemical Corporation, Beijing 100029, China*

Abstract Based on integral formula, discrete second electrical field is expressed as a sum of elementary contributions coming from charges accumulated on the surfaces of resistivity discontinuity. The electrical field of a positive unit point charge is introduced as space domain scanning (SDS) function, and charge occurrence probability (COP) is defined as the cross-correlation of the second electrical field with the SDS function. In order to analyze COP anomalies, COP function is normalized. To test the effectiveness of probability tomography of second electrical field, we use finite element algorithm to synthesize second electrical field for several models, and implement multiple superimposed tomography of probability. The results are quite satisfactory.

Keywords Electrical resistivity tomography, Second electrical field, Probability tomography, Space domain scanning (SDS) function, Normalized charge occurrence probability (NCOP) function

基金项目 国家自然科学基金项目(40774070, 40474048)和中国地质大学(北京)“地下信息探测技术与仪器”教育部重点实验室开放课题(GDL0604)资助.

作者简介 闫永利, 男, 1957 年生, 1982 于南开大学数学系获学士学位; 1995 年于中国地质大学(北京)应用地球物理系获博士学位, 1998 年中国科学院地球物理研究所博士后出站后留所工作, 主要从事电磁反演与成像研究. E-mail: ylyan@mail.igcas.ac.cn

1 引言

电阻率法起源于 20 世纪初. 早期电阻率法采用的是测量装置沿测线不断移动的逐点观测方式, 测量速度慢、观测点稀、分辨率低. 1987 年, Shima^[1] 仿照医学 CT 扫描的方法, 提出了多方位、近距离对地下电性结构进行探测的电阻率层析成像(ERT)方法. 在过去 20 年间, ERT 方法得到快速发展, 野外测量实现了阵列式数据采集模式, 几十乃至上百条电极在测量前先行布设, 观测过程中通过仪器内部线路开关的自动转换使数据采集实现了自动化和智能化, 测量速度快, 数据采集量大, 分辨率高. ERT 测量使用直流电流源, 抗工业无线电噪音干扰, 并对勘探现场无破坏作用, 已被广泛用于金属矿产资源勘探^[2,3]、考古与工程地质勘查^[4~8]及土壤与地下水污染调查^[9~11], 成为浅层电性结构研究和工程地质探测的强有力的手段.

均匀半空间中赋存地质异常体的电性结构在地热和金属矿产资源勘探^[12~14]、地下环境监测与考古调查^[15~17]以及工程地质勘查^[18]等领域有着广泛的应用. 目前 2-3D ERT 资料处理、解释还局限于线性反演方法, 如 Shima^[19]提出的 α 中心法, Loke 等^[20]的最小二乘卷积法, Lesur 等^[21]的积分方程法, 以及 Park^[22]和闫永利等^[23]提出的电阻率扰动反演法. 但对 2-3D ERT 线性反演而言, 计算工作量大, 迭代收敛的不稳定已成为严重制约其应用与发展的瓶颈^[24].

概率成像方法是借助引进空间扫描(SDS)函数, 通过成像场与 SDS 函数的相关性来揭示地下异常体的分布状态. 以往人们只是对被动源电法勘探, 如自然电位法和大地电磁法实现了概率成像^[25~28]. 被动源电法概率成像通常不考虑剔除一次场成份, 用于揭示地下异常体空间位置的积累电荷出现的概率(COP)函数定义为观测电场与 SDS 函数的互相关. 但对主动源的 ERT 方法则不同, 观测电流场中一次电流场占主导成份, 而一次电流场与地下异常体分布状态无关, 真正反映地下异常体分布状态的是二次电流场. 因此, 我们这里采用了二次电流场作为成像场, 将 COP 函数定义为二次电流场与 SDS 函数的互相关. 为克服不同地电结构的 COP 函数异常值的变化对定量分析、解释产生的影响, 本文提出了规范的电荷积累出现的概率(NCOP)函数. 通过对均匀半空间中赋存 2D 地质异常体的地电模型的研究表明, 二次电流场概率成像结果对地

下异常体的分布范围有较好的指示作用.

2 二次电流场概率成像方法原理

对于均匀半空间背景下赋存地质异常体的电性结构, 根据 Dieter^[18]的理论, 地下稳定电流场的电位 $U(P)$ 可以分解为一次电位 $U_p(P)$ 和二次电位 $U_a(P)$ 之和:

$$U(P) = U_p(P) + U_a(P), \quad (1)$$

$$U_p(P) = \frac{\rho_0 I_s}{4\pi(r + \bar{r})}, \quad (2)$$

其中 I_s 表示位于 $C_s(x_s, y_s, z_s)$ 处的点电流源的强度(图 1), ρ_0 是均匀半空间背景的电阻率, $r = \overline{CP}$, $\bar{r} = \overline{C_sP}$.

$$U_a(P) = \sum_{i=1}^T \iint_{S_i} \sigma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\bar{R}} \right) dS_i, \quad (3)$$

这里, T 代表异常体个数, σ 为积累电荷的面密度, r, \bar{r}, R 和 \bar{R} 的几何意义见图 1.

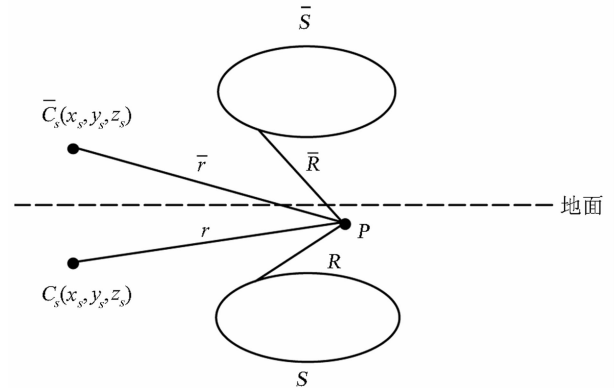


图 1 几何因子 r, \bar{r}, R 和 \bar{R} 示意图

Fig. 1 The illustration of geometric factors of r, \bar{r}, R and \bar{R}

把目标体 S_i 离散为 N_{S_i} 个地电单元 ΔS_{i_m} ($m = 1, 2, \dots, N_{S_i}$), 在 ΔS_{i_m} 上 σ, R, \bar{R} 近似为常数, 则 U_a 可表示为

$$U_a(P) = \sum_{i=1}^M \frac{\Gamma_i}{(R_i + \bar{R}_i)}, \quad (4)$$

$$R = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

$$\bar{R} = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z + z_i)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

这里, $P(x, y, z)$ 表示观测点, $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 代表第 i 个地电单元上的近似点, Γ_i 为第 i 个单元积累电荷的强度, $M = \sum_{i=1}^T N_{S_i}$.

对于位于 x 坐标轴上的 ERT 观测点 $P(x, 0, 0)$,

二次电流场 $E_a(x)$ 可表示为

$$E_a(x) = \sum_{i=1}^M \Gamma_i \frac{(x-x_i)}{2R_i^3}. \quad (7)$$

为从物理意义上阐明二次电流场概率成像的原理,将 $E_a(x)$ 分解为

$$E_a(x) = \sum_{i=1}^M E_i(x-x_i, y_i, z_i), \quad (8)$$

其中

$$E_i(x-x_i, y_i, z_i) = \Gamma_i \zeta_i(x-x_i, y_i, z_i), \quad (9)$$

$$\zeta_i(x-x_i, y_i, z_i) = \frac{(x-x_i)}{2R_i^3}. \quad (10)$$

概率成像的目的就是确定积累电荷的坐标 $P_i(x_i, y_i, z_i) (i=1, 2, \dots, M)$ 点位置,用以重构地质异常体的分布范围和几何形态.

显然, $\zeta_i(x-x_i, y_i, z_i)$ 、 $E_i(x-x_i, y_i, z_i)$ 分别为地下均匀半空间 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 点上单位正点电荷和强度为 Γ_i 的点电荷产生的电场,因为 $E_a(x)$ 可分解为地下一系列强度为 Γ_i 的点电荷产生的电场 $E_i(x-x_i, y_i, z_i)$ 的代数和,自然可以通过地下均匀半空间各点 $P_\tau(x_\tau, y_\tau, z_\tau)$ 上强度为 Γ_τ 的试探点电荷产生的电场 $E_\tau(x-x_\tau, y_\tau, z_\tau)$ 与二次电流场 $E_a(x)$ 的互相关,来揭示 $E_a(x)$ 中是否包含 $E_\tau(x-x_\tau, y_\tau, z_\tau)$ 的成分,用以推断 $P_\tau(x_\tau, y_\tau, z_\tau)$ 处存在积累电荷的可能性的.因此,积累电荷出现的概率(COP)函数定义为

$$\begin{aligned} \eta(x_\tau, y_\tau, z_\tau) &= \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} E_a(x) E_\tau(x-x_\tau, y_\tau, z_\tau) dx}{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} E_a^2(x) dx \int_{-\infty}^{+\infty} E_\tau^2(x-x_\tau, y_\tau, z_\tau) dx \right]^{\frac{1}{2}}} \\ &= \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} E_a(x) \zeta_\tau(x-x_\tau, y_\tau, z_\tau) dx}{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} E_a^2(x) dx \int_{-\infty}^{+\infty} \zeta_\tau^2(x-x_\tau, y_\tau, z_\tau) dx \right]^{\frac{1}{2}}}, \end{aligned} \quad (11)$$

这里, $\zeta_\tau(x-x_\tau, y_\tau, z_\tau)$ 被称为空间域扫描(SDS)函数.

从(11)式可以看出,尽管 $E_\tau(x)$ 中包含一个未知的点电荷强度系数 Γ_τ ,但在 COP 函数计算中, Γ_τ 可被简单地规避掉. $\zeta_\tau(x-x_\tau, y_\tau, z_\tau)$ 只是空间坐标的函数.

3 多次叠加概率成像算法

3.1 二次电流场计算方法

根据公式(1),可得到地下稳定电流场 $E(x)$ 、一

次电流场 $E_p(x)$ 和二次电流场 $E_a(x)$ 的耦合关系式

$$E_a(x) = E(x) - E_p(x). \quad (12)$$

COP 函数(11)式计算要求成像的二次电流场 $E_a(x)$ 剖面应无限长,但对 ERT 实际观测所能做到的是使成像场 $E_a(x)$ 剖面充分长,以尽可能减小边界效应的影响.通常的地表 2-D ERT 的 Pole-pole 观测装置采用的是单向数据采集模式(图 2),即当第 i 根电极作为供电电极时,仅 $(i+1), (i+2), \dots, N$ 根电极进行数据采集.采用 Pole-pole 装置单向数据采集模式,虽然可以由此得到多条二次电流场剖面,但剖面长度会越来越短,大多剖面难以满足成像要求.这里,我们提出了新的双向 Pole-pole 装置观测模式,即当第一次从左到右观测完成后,在保持电极位置和供电电流强度不变的前提下,通过调换观测仪器与电缆线的接口,进行从右到左的观测.

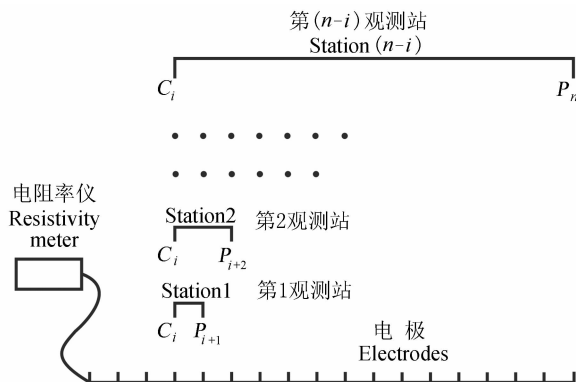


图 2 2-D ERT Pole-pole 观测装置数据采集模式
Fig. 2 Sequence of measurements on 2-D ERT Pole-pole configuration

对于双向 Pole-pole 观测模式,假设地表各观测电极沿 x 方向的坐标从左到右依次为 x_1, x_2, \dots, x_N ,当第 k 根电极作为供电电极时,可以得到各观点 $x_i (x_i \neq x_k)$ 处的电位值 U_i^k .则相应的各观测点处电流场的计算公式为

$$E^k(x) = 0, x \leq x_1, x = x_k, x \geq x_N, \quad (13)$$

$$E^k(x_i) = \frac{U_{i+1}^k - U_{i-1}^k}{x_{i+1} - x_{i-1}}, i = 2, 3, \dots, N-1; \quad i \neq k-1, k, k+1 \quad (14)$$

$$E^k(x_{i-1}) = E^k(x_{i-2}) + \frac{E^k(x_{i-2}) - E^k(x_{i-3})}{x_{i-2} - x_{i-3}} \times (x_{i-1} - x_{i-2}), \quad (15)$$

$$E^k(x_{i+1}) = E^k(x_{i+2}) + \frac{E^k(x_{i+3}) - E^k(x_{i+2})}{x_{i+3} - x_{i+2}} \times (x_{i+1} - x_{i+2}), \quad (16)$$

这里 x_k 是供电电极所在位置.

而各观测点 x_i 处一次电场 $E_p(x)$ 可以通过解析式求得

$$E_p^k(x_k) = 0, \quad (17)$$

$$E_p^k(x_i) = \frac{\rho_0 I_s}{2\pi} \frac{(x_i - x_k)}{R_{ik}^3},$$

$$i = 1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, N \quad (18)$$

其中, $R_{ik} = |x_i - x_k|$.

这样,可通过(12)式简单的计算,得到对应于第 k 根电极作为供电电极时各观测点处的二次电流场 $E_a^k(x_i)$ 的值. 因此,对于 N 根电极的双向的 Pole-pole 观测剖面,我们实际可得到 N 条长度相同的二次电流场 $E_a^k(x_i)$ ($k=1, 2, \dots, N$) 剖面.

3.2 多次叠加概率成像计算方法

用 Δx 表示 Pole-pole 测量装置的电极距长度,取地下成像区网格节点坐标:

$$x_a = x_1 + \alpha \Delta x, \quad z_\beta = \beta \Delta x, \quad (19)$$

这里 α 和 β 为整数,其中 $\beta > 0$.

对于 N 条二次电流场剖面 $E_a^k(x)$ ($k=1, 2, \dots, N$) 和各网格节点 $P(x_a, z_\beta)$,当通过数值积分得到 $\mu(k) = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} (E_a^k(x))^2 dx \right]^{\frac{1}{2}}$ 和 $\nu(z_\beta) = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \zeta^2(x - x_a, z_\beta) dx \right]^{\frac{1}{2}}$ 后,多次叠加概率成像的 COP 函数 $\eta(x_a, z_\beta)$ 表示为

$$\eta(\alpha, \beta) = \frac{1}{N \Delta x} \sum_{k=1}^N \frac{1}{\mu(k) \nu(z_\beta)} \sum_{l=1}^{N-1} E_a^k(x_l) \times \left\{ \frac{(l - \alpha - 1)}{[(l - \alpha - 1)^2 + \beta^2]^{\frac{3}{2}}} \right\}, \quad (20)$$

这里 $\beta > 0$ 是保障积分 $\nu(z_\beta) = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \zeta^2(x - x_a, z_\beta) dx \right]^{\frac{1}{2}}$ 收敛必要条件.

为了从定量化的角度对二次电流场多次叠加概率成像的结果进行解释,克服不同地电结构 COP 函数异常值的变化对定量对比、分析产生的影响,这里采用了规范的积累电荷出现的概率 (NCOP) 函数 $\bar{\eta}(\alpha, \beta)$. 其计算公式:

$$\bar{\eta}(\alpha, \beta) = \frac{1}{\max(|\eta(\alpha, \beta)|)} \eta(\alpha, \beta). \quad (21)$$

值得指出的是,NCOP 只改变 COP 函数的取值范围,将 COP 异常的最大或最小值调整到 1 或 -1,其并不改变 COP 图形的几何形态.

4 2-D 地电模型成像效果与分析

图 3 给出的是地下均匀半空间中赋存单个 2-D 板状异常体的地电断面和多次叠加概率成像的结果. 2-D 板状异常体的走向沿 y 方向,高 80 m,宽 40 m,

其 $x-z$ 断面上分布范围为: $-20 \text{ m} \leq x \leq 20 \text{ m}$; $-100 \text{ m} \leq z \leq -20 \text{ m}$,图 3a 给出的是地电模型断面图. 我们应用 2-D 有限元法^[23]对 Pole-pole 测量装置的地下电流场的电位进行了正演计算,在垂直 2-D 异常体走向的地表剖面上,共布设 81 根电极,电极间距为 5 m,点电流源强度为 1A. 通过正演得到地下电流场的电位后,根据(12)~(18)式合成出二次电流场,然后利用了 10~71 号电极作为供电电极得到的二次电流场剖面进行了多次叠加概率成像. 图 3(b,c)给出的是多次叠加概率成像结果. 其中围岩电阻率 $\rho_0 = 100 \text{ } \Omega\text{m}$,图 3b 是相对良导体 $\rho_1 = 10 \text{ } \Omega\text{m}$ 的成像结果,图 3c 是相对高阻体 $\rho_1 = 1000 \text{ } \Omega\text{m}$ 的成像结果. 从多次叠加概率成像的结果看,良导体分布范围大致与 NCOP 负异常 ($-1.0 \sim -0.8$) 相对应,而高阻体分布范围大致与 NCOP 正异常 ($0.7 \sim 1.0$) 相对应. 良导体和高阻体分别与 NCOP 负异常和 NCOP 正异常相对应这一现象,可以从物理意义上得到很好的解释. 因为对良导体而言,其对地下传导电流具有吸引作用,也就是说在良导体表面积累有负电荷,由这种负电荷产生的二次电场显然与异常体附近放置的单位正点电荷产生的电场具有负相关. 对高阻体而言,则正好相反. 此外,在远离高导体的区域,伴随有弱的正 NCOP 异常的出现,而在远离高阻体的区域,伴随有弱的负 NCOP 异常出现. 以上现象是地下电流场通道效应作用的结果. 因高导体对地下电流的吸引作用,使远离高导体的区域电流强度相对减弱,这等效于在远离高导体的区域积累有正电荷,起着排斥电流的作用. 显然,这种等效的正电荷产生的电场与邻近放置的单位正点电荷的电场具有正相关. 对高阻体而言,则相反.

图 4 给出的是地下均匀半空间中赋存两个高为 40 m,宽为 20 m 的 2-D 板状体的地电断面和多次叠加概率成像的结果. 在 $x-z$ 断面上,左侧板状体分布范围为: $-100 \text{ m} \leq x \leq -80 \text{ m}$; $-60 \text{ m} \leq z \leq -20 \text{ m}$; 右侧板状体分布范围为: $80 \text{ m} \leq x \leq 100 \text{ m}$; $-60 \text{ m} \leq z \leq -20 \text{ m}$. 均匀半空间电阻率 $\rho_0 = 100 \text{ } \Omega\text{m}$,板状体电阻率 $\rho_1 = 10 \text{ } \Omega\text{m}$. 正演剖面 and 观测方式的设计与模型 1 相同. 从多次叠加概率成像的结果看,NCOP ($-1.0 \sim -0.80$) 的负异常对两个板状体的空间位置有很好的指示作用.

成像过程中,考虑到用有限长剖面代替无限长剖面,成像场强度在观测剖面以外越小越好的因素,舍弃了剖面两端附近电极作为供电电极得到的二次电流场剖面.

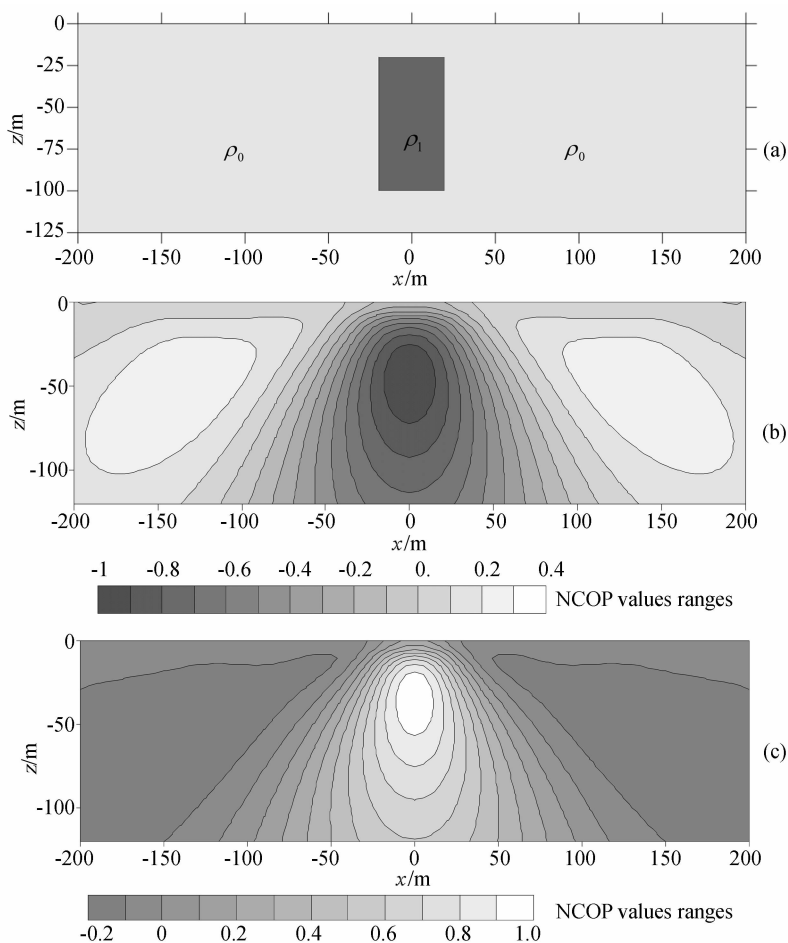


图 3 均匀半空间中赋存单一地质异常体的地电断面和多次叠加概率成像结果
(a)模型地电断面;(b)相对高导体的成像结果;(c)相对高阻体的成像结果.

Fig. 3 The cross-section of model and results of multiple superimposed tomography of probability on second electrical field

(a) Cross-section of model;(b) Result of a conductive body;(c)Result of a resistive body.

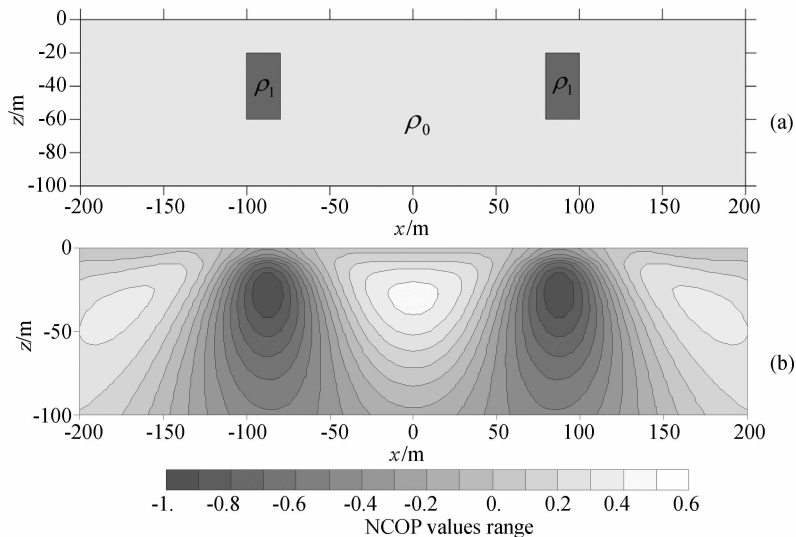


图 4 均匀半空间中赋存两个地质异常体的地电断面(a)和多次叠加概率成像结果(b)

Fig. 4 The cross-section of the model and results of multiple superimposed tomography of probability on second electrical field

(a) Cross-section of the model;(b)Result of multiple superimposed tomography of probability.

5 结 论

本文基于二次电流场的离散化公式,通过引入空间扫描(SDS)函数,提出了利用二次电流场与SDS函数的互相关函数作为推断地下各点处积累电荷出现的可能性大小,重构地下电性异常体空间位置的多次叠加概率成像方法。

通过对 2-D ERT Pole-pole 装置单向数据采集模式的革新,提出了 2-D ERT Pole-pole 装置双向数据采集的新模式。这种新的数据采集模式最大程度地提取到充分满足了多次叠加概率成像方法要求的二次电流场剖面。

对于均匀半空间中赋存地质异常体的地电模型,二次电流场多次叠加概率成像对异常体的分布范围有较好的指示作用。良导体的空间位置大致与 $-0.8 \sim -1.0$ 的 NCOP 负异常的分布范围相对应,而高阻体大致与 $0.7 \sim 1.0$ 的 NCOP 正异常相对应。

参考文献(References)

- [1] Shima H, Sakayama T. Resistivity tomography: An approach to 2-D resistivity inverse problems. 57th SEG Meeting, 1987, Expanded Abstracts. 204~207
- [2] Mallol J M, Sequin M K, Gupta O P, et al. Electrical resistivity tomography survey for delineating uncharted mine galleries in west Bengal India. *Geophysical Prospecting*, 1999, **47**:103~116
- [3] 杨发杰,巨妙兰,刘全德. 高密度电阻率法探测方法及其应用. *矿产与地质*, 2004, **18**(4):356~360
Yang F J, Ju M L, Liu Q D. High density resistivity survey in method and its application. *Mineral Resources and Geology* (in Chinese), 2004, **18**(4):356~360
- [4] Mauriello P, Monna D, Patella D. 3-D geoelectric tomography and archaeological application. *Geophysical Prospecting*, 1998, **46**: 543~570
- [5] 郭秀军,贾永刚,黄萧雨等. 利用高密度电阻率法确定滑坡面研究. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(10):1662~1669
Guo X J, Ja Y G, Huang X Y, et al. Application of multi-electrodes electrical method to detection of slide-face position. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2004, **23**(10):1662~1669
- [6] Lapenna V, Lorenzo P, Perrone A, et al. 2D electrical resistivity imaging of some complex landslides in the Lucanian Apennine chain, southern Italy. *Geophysics*, 2005, **70**(3): B11~B18
- [7] Friedel S, Thielen A, Springman S M. Investigation of a slope endangered by rainfall-induced landslides using 3D resistivity tomography and geotechnical testing. *Journal of Applied Geophysics*, 2006, **60**:100~104
- [8] Alaia R, Patella D, Mauriello P. Application of geophysical 3D probability tomography in a test-site of the archaeological park of Pompei. *Journal of Geophysical and Engineering*, 2008, **5**:67~76
- [9] Daily W, Ramirez A, Brecque D L, et al. Electrical resistance tomography experiments at the Oregon Graduate Institute. *Journal of Applied Geophysics*, 1995, **33**:227~237
- [10] Ogily R, Meldrum P, Chambers J. Imaging of industrial waste deposits and burred quarry geometry by 3D resistivity tomography. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1999, **3**:221~244
- [11] Buselli G, Kangglin L. Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods. *Journal of Applied Geophysics*, 2001, **48**:11~23
- [12] Bibby H M. Direct current resistivity modeling for axially symmetric bodies using the finite element method. *Geophysics*, 1978, **43**(3):550~562
- [13] Pellton W H, Rijo L, Swift C M. Inversion of two-dimensional resistivity and induced-polarization data. *Geophysics*, 1978, **43**(4):788~803
- [14] Petric W R, Sill W R, Ward S H. Three-dimensional resistivity inversion using alpha centers. *Geophysics*, 1981, **46**(8):1148~1162
- [15] Weller A, Frangos W, Seichter M. Three-dimensional inversion of induced polarization data from simulated waste. *Journal of Applied Geophysics*, 1999, **41**:31~47
- [16] Osella A, Vega M, Lascano E. 3-D electrical imaging of an archaeological site using electrical and electromagnetic methods. *Geophysics*, 2005, **70**(4):G101~G107
- [17] Hauck C, Muhll D V, Maurer H. Using DC resistivity tomography to detect and characterize mountain permafrost. *Geophysical Prospecting*, 2003, **51**: 273~284
- [18] Dieter K, Paterson R, Grant F S. Ip and resistivity type curves for three-dimensional bodies. *Geophysics*, 1969, **34**(4):615~632
- [19] Shima H. 2-D and 3-D resistivity image reconstruction using crosshole data. *Geophysics*, 1992, **57**(10):1270~1281
- [20] Loke M H, Barker R D. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 1995, **60**(6):1682~1689
- [21] Lesur V, Cuer M, Straub A. 2-D and 3-D interpretation of electrical tomography measurements, Part 2: The inverse problem. *Geophysics*, 1999, **64**(2):396~402
- [22] Park S K, Van G P. Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath array of electrodes. *Geophysics*, 1991, **45**(7):951~960
- [23] 闫永利,马晓冰,底青云等. 层状介质二维电阻率扰动反演方法. *地球物理学报*, 2004, **47**(6):1139~1144
Yan Y L, Ma X B, Di Q Y, et al. 2-D resistivity inversion of perturbation in the layered-earth. *Chinese J. Geophys.* (in

- Chinese), 2004, **47**(6):1139~1144
- [24] 曹立斌, 孟永良, 周建兰. 电阻率层析成像技术的回顾与展望. 勘探地球物理进展, 2004, **27**(3):170~174
Cao L B, Meng Y L, Zhou J L. Review and prospect of resistivity tomography technology. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 2004, **27**(3):170~174
- [25] Patella D. Introduction to ground surface self-potential tomography. *Geophysical Prospecting*, 1997, **45**:653~681
- [26] Patella D. Self-potential global tomography including topographic effects. *Geophysical Prospecting*, 1997, **45**: 843~863
- [27] Mauriello P, Patella D. Principles of probability tomography for natural-source electromagnetic induction fields. *Geophysics*, 1999, **64**(5): 1403~1417
- [28] 许令周, 关继腾, 房文静. 自然电场的概率成像方法评价. 物探与化探, 2003, **27**(5):395~398
Xu L Z, Guan J T, Fang W J. The evaluation of the probability imaging technology for natural electrical field. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 2003, **27**(5):395~398

(本文编辑 汪海英)