

可控源音频大地电磁圆滑反演方法及应用效果

陆桂福, 刘瑞德, 梅岩辉, 黄力军

(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000)

[摘要] 针对可控源音频大地电磁一维反演需要给定初始参数, 存在很大的人为性, 解的不确定性, 并难以确认解决复杂地质问题的可靠性等问题, 人们一直在探讨减少反演解释中不确定因素的方法。文章介绍美国 Zonge 公司研制的可控源音频大地电磁圆滑反演方法用于解决上述问题的特点以及在中国实际应用的效果。

[关键词] 电磁测深法 圆滑反演 应用效果

[中图分类号] P631.3 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2004)S0-0191-03

0 引言

可控源音频大地电磁测深法(简称 CSAMT 法), 其以有限长导线为场源, 在距场源中心 r 处观测电磁场的一种电磁测深方法。一般工作中多采用赤道偶极装置, 即在垂直场源一定区域内, 观测与场源平行的电场水平分量 E_x 和与场源垂直的磁场水平分量 H_y , 利用实测的电磁场振幅计算卡尼亚电阻率和相位。反演采用卡尼亚电阻率和相位联合反演技术。

1 圆滑模型反演算法

1.1 反演算法^[1]

现在假设有 M 组实测数据, 分别为 d_1, d_2, \dots, d_M 。这些可以是频率域的电阻率和相位测深数据、电阻率测深数据或组合的联合反演数据。相应的正演函数为 $F_j[m]$, 在反演中使用加权最小二乘法拟合实际地电模型, 相应的目标函数为

$$\Psi(m) = \sum_{j=1}^M (d_j - F_j[m])^2 / \sigma_j^2 \quad (1)$$

假设观测数据是独立的, 这里 σ_j 是第 j 组数据标准离差。(1)式写成矩阵形式

$$\Psi(m) = \| \underline{W}d - \underline{W}F[m] \|^2 \quad (2)$$

这里 \underline{W} 是 $M \times M$ 阶对角矩阵

$$\underline{W} = \text{diag}\{1/\sigma_1, 1/\sigma_2, \dots, 1/\sigma_M\}$$

在计算中假定地层是连续变化的, 用一阶导数

或二阶导数平方的积分的形式限定其圆滑程度:

$$R_1 = \int (dm/dz)^2 dz \quad (3)$$

或

$$R_2 = \int (d^2m/dz^2)^2 dz$$

这里 $m(z)$ 是电阻率或对数电阻率, 在计算中可以表示为:

$$m(z) = m_i, z_{i-1} < z \leq z_i, i = 1, 2, \dots, N,$$

离散化的(3)式可以写成

$$R_1 = \sum_{i=2}^N (m_i - m_{i-1})^2 \quad (4)$$

和

$$R_2 = \sum_{i=2}^{N-1} (m_{i+1} - 2m_i + m_{i-1})^2$$

通过简单的矩阵运算(4)式可以写成:

$$R_1 = \| \underline{\partial} m \|^2 \quad (5)$$

或

$$R_2 = \| \underline{\partial} \underline{\partial} m \|^2 = \| \underline{\partial}^2 m \|^2$$

这里 $\underline{\partial}$ 是 $N \times N$ 阶矩阵

$$\underline{\partial} = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ -1 & 1 & & 0 \\ & -1 & 1 & \\ & & \dots & \\ 0 & & & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

阻尼最小二乘算法的目标函数为

[收稿日期] 2004-09-10; [责任编辑] 曲丽莉。

[第一作者简介] 陆桂福(1966年-), 男, 1992年毕业于长春地质学院, 工程师, 现主要从事电磁法勘查研究和生产工作。

$$\Psi(m) = \mu \|\partial m\|^2 + \|\bar{W}d - \bar{W}F[m]\|^2$$

这里右边的第一项是光滑度,第二项是拟合差, μ 是阻尼因子,相应的迭代求解参数改正量 Δm 的法方程组为:

$$(\bar{W}\bar{J})^T \bar{W}\bar{J}\Delta m - (\bar{W}\bar{J})^T \bar{W}\Delta d + \mu \partial^T \partial \Delta m = 0 \quad (6)$$

这里 \bar{J} 是 $M \times N$ 矩阵的雅克比矩阵(偏导数矩阵),

$$\bar{J} = \nabla_m F$$

矩阵的元素为:

$$J_{ij} = \frac{\partial F_i[m]}{\partial m_j}$$

第 $k+1$ 次迭代向量为

$$\Delta m_{k+1}(\mu) = [\mu \partial^T \partial + (\bar{W}\bar{J}_k)^T \bar{W}\bar{J}_k]^{-1} (\bar{W}\bar{J}_k)^T \bar{W}\Delta d_k \quad (7)$$

1.2 初始模型选取

常规电磁法一维反演,需要根据实测曲线人为确定反演地层数,给定初始的层厚度(h_1, h_2, \dots, h_{N-1})及层电阻率($\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$),这里 N 为地层数。

圆滑反演是根据实测数据将地层划分成 N 层,并确定出每层的深度,在反演中深度是不变的,直接迭代反演电阻率。

2 反演实例

2.1 金属矿勘查实例

这是位于甘肃省境内祁连山腹地,海拔3600m以上的一个海相火山岩块状硫化物矿点外围找矿实例。石居里I号沟矿点紧邻走向 $300^\circ \sim 310^\circ$ 区域性断裂,地层为下奥陶统阴沟组上岩组,岩性为细碧玢岩、火山角砾岩、细碧凝灰岩、凝灰质砂岩和英安凝灰岩等。

采用可控源音频大地电磁测深方法对激电异常进行评价中,在87号点海拔3750m处发现与激电异常对应的电阻率异常(图1)。经对比分析认为该处异常为矿致异常,根据我们推断结果验证当年见矿,矿体埋深43m,矿体长18m,向下延伸16m,平均厚度2m,Cu平均品位大于8%。这个实例表明,其反演方法横向分辨率相应较高,能够发现深度与体积比较大的低阻体。

2.2 地热资源勘查实例

这是北京市远郊的勘查实例,测区大部为第四系所覆盖,第四系(Q)由粘土、粉砂和砂砾石组成;第四系下部为白垩系(K)砂岩和侏罗系(J)砂岩,

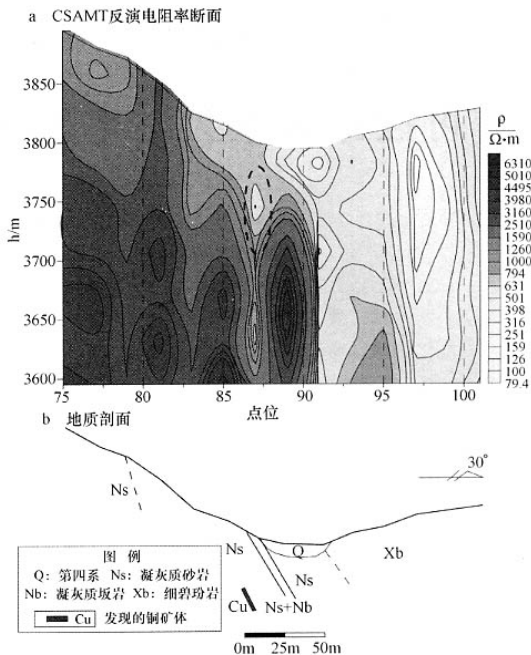


图1 甘肃×铜矿点地质物探综合剖面图

侏罗系内穿插有火山岩;侏罗系下部为蓟县系(Jx),岩性主要为白云岩。

区内地层间电性差异较为明显,第四系电阻率较低,约 $20\Omega \cdot m$ 左右;白垩系电阻率 $20 \sim 50\Omega \cdot m$;侏罗系砂岩电阻率为 $50 \sim 100\Omega \cdot m$;蓟县系白云岩电阻率大于 $500\Omega \cdot m$ 。各时代地层岩性之间电阻率存在明显差异,为电法勘探工作提供了充分的地球物理前提。

图2是该区×线可控源音频大地电磁测深反演电阻率和地质解释综合断面图,由图可见,断面内除90号点附近出现断层外,从剖面起点到端点断面电阻率逐渐升高,符合实际地层呈单斜变化趋势。断面内0~500m为第四系,除河滩局部出现高阻外,电阻率均很低;除第四系和白垩系间电阻率差异较小,层间电阻率呈渐变关系,两者间界面不太明显外,白垩系—侏罗系—蓟县系界面非常清楚。实际验证(地热井)在1296m见蓟县系白云岩,并已开发出中温热水,利用CSAMT反演电阻率推断蓟县系白云岩顶界面深度与实际地热井验证深度结果仅差几十m(图2)。

这个实例说明该反演方法纵向分辨率也相应较高,1000m以下分辨率能够达到10%,完全能够满足实际工作需要。

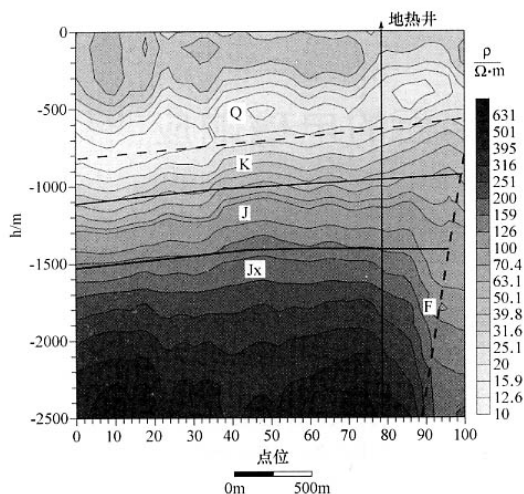


图2 北京市×区CSAMT勘查综合断面图

3 结论

目前尚没有实用的二维可控源音频大地电磁反演程序,所以一维模型反演是可控源音频大地电磁常用的解释方法。层状模型的电磁测深一维反演需要给定初始参数,存在很大的人为性;由于等值性,电磁测深反演往往是多解的。地下地质情况往往非常复杂,利用电磁测深资料进行地质解释本来就存在多解性,反演的非唯一性给电磁测深的实际应用带来更多的不确定因素,所以人们一直在探讨减少反演解中不确定因素的方法。上述实际应用结果表明,圆滑反演方法没有人为干预,能够满足一维解释工作需要。

[参考文献]

- [1] Constable S C, Parker R L, and Constable C G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data[J]. Geophysics, 1987, 52(3): 289 ~ 300.

A SMOOTHING INVERSION TECHNIQUE FOR CSAMT AND ITS APPLICATIONS

LU Gui-fu, LIU Rui-de, MEI Yan-hui, HUANG Li-Jun

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000)

Abstract: Problems in CSAMT surveys attracting much attentions have been the subjective in assigning initial guess for 1-D inversion, ambiguity in solution and uncertainty in interpretation for complex geological models. Sustained efforts have been made for reducing uncertainty factors in the inversion of CSAMT data. A smoothing inversion technique for CSAMT developed by Zonge Corporation, USA, has been discussed in the paper with its applications in China introduced.

Key words: CSAMT, smoothing inversion, application