

二维直流电阻率测深曲线的快速反演

阮百尧 徐世浙

(青岛海洋大学地质地球物理研究所, 青岛 266003)

摘 要 本文采用作者提出的一维直流电阻率测深的直接反演公式, 结合二维正演和渐近迭代反演, 推出了一种二维直流电阻率测深的快速反演方法, 经实际应用, 效果很好。

关键词 电阻率测深, 二维正演, 渐近反演。

0 引言

直流电阻率测深常规的二维线性反演方法需计算 Jacobian 矩阵和求解线性方程组, 但该矩阵的规模一般很大, 生成时需要多次求解二维正演问题, 计算量相当惊人, 且方程组还常常是病态的。为了解决这个问题, Barker(1992)利用 Zohdy(1989)的电阻率测深曲线自动反演技术, 给出了一种不需要计算矩阵, 求解方程组的二维电阻率测深的简便反演方法, 即用近似反演结果作为初始模型, 进行二维正演计算, 然后用实测测深曲线与预测曲线的比值来修改模型的电阻率参数、渐近迭代反演。但由于 Zohdy 法本身的缺点和在渐近迭代中单纯地修改电阻率参数影响了方法的收敛速度和精度。

本文采用作者(1994)提出的一维电阻率测深反演公式作为近似反演方法, 并在二维正演中, 采用异常电位法和双网格系统来进行有限元数值计算。在渐近迭代反演中同时修改电阻率和深度参数, 从而既提高了反演精度, 又使二维反演变得更加简便快速。经对理论模型和实测数据反演结果证明效果很好。

1 一维直流电测深直接反演公式

设 $\rho_s(i)$ 为第 i 个极距 $r_1(=(AB/2)_i)$ 所测的视电阻率, 则该极距所反映的地层的真实电阻率 $\rho(i)$ 为

$$\rho(i) = \begin{cases} \rho_s(i) \sqrt{\frac{1+d_i}{1-d_i}} & d_i \geq 0 \\ \rho_s(i) \sqrt{\frac{8+d_i}{8-d_i}} & d_i < 0 \end{cases} \quad (1)$$

该层对应的厚度是

$$h(i) = \begin{cases} (r_i - r_{i-1}) \sqrt{1-d_i^2} & d_i \geq 0 \\ \frac{(r_i - r_{i-1})}{8} \sqrt{64-d_i^2} & d_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $d_i = \frac{d \log \rho_i}{d \log r}$ 为测深曲线在第 i 个极距 r_i 处的梯度。

图 1a 中直接反演曲线就是用上述公式对一四层模型的理论直流电阻率测深曲线的反演结果,可以看到,它对各电性有较好的反映,且深度对应很好。

2 渐近迭代反演方法

作者采用下面的方法来进行渐近迭代反演。首先用公式(1)、(2)计算各测深点下各电性层的近似电阻率和厚度,构成二维预测模型,进行二维正演计算,然后比较实测曲线和正演所得的理论曲线,若拟合差满足要求,则预测模型便是反演结果,否则就对理论曲线进行近似反演,再用下面的公式(3)(阮百尧等,1995)来修改模型参数,重新进行二维正演、曲线对比、近似反演、修改模型,整个过程交替重复直至满足要求

$$\rho^{(n+1)}(i, j) = \rho^{(n)}(i, j) + c\rho^{(n)}(i, j) \left(\frac{\bar{\rho}^{(0)}(i, j)}{\bar{\rho}^{(n)}(i, j)} - 1 \right) \quad (3)$$

$$h^{(n+1)}(i, j) = h^{(n)}(i, j) + ch^{(n)}(i, j) \left(\frac{\bar{h}^{(0)}(i, j)}{\bar{h}^{(n)}(i, j)} - 1 \right)$$

式中 $\rho^{(n)}(i, j)$ 、 $h^{(n)}(i, j)$ 为第 n 次模型第 i 个测深点下第 j 层的真电阻率和厚度; $\bar{\rho}^{(0)}(i, j)$ 、 $\bar{h}^{(0)}(i, j)$ 、 $\bar{\rho}^{(n)}(i, j)$ 、 $\bar{h}^{(n)}(i, j)$ 则分别为第 i 个测深点实测和第 n 次模型预测的视电阻率测深曲线用直接反演公式(1)(2) 计算得到的该点下第 j 层的近似电阻率和厚度; c 为修正系数,用于控制模型参数修改量的大小。这种渐近迭代反演方法在一维电阻率测深曲线的解释中效果很好,见图 1a 迭代反演曲线。图 1b 为真实模型和反演结果的测深曲线对比图。

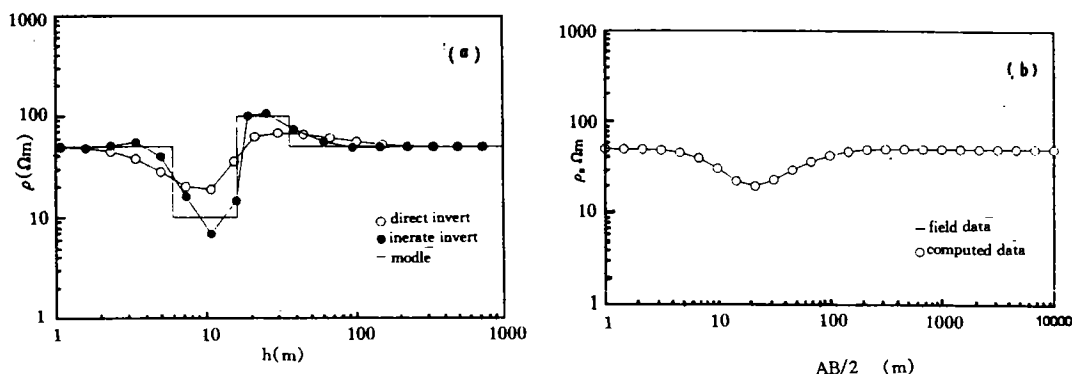


图 1 一维反演结果

a - 反演结果与真实模型对比; b - 测深曲线对比

3 二维正演方法中的网格剖分问题

3.1 横向网格的剖分

二维直流电阻率测深的反演,一般需要计算多个测点上的电阻率测深曲线,这就要求所剖分网格既能反映地下电性变化,又能方便进行正演计算。通常做法是使用一个网格,但由于它

需要众多的横向网格节点,要求计算机有较大的内存,计算速度也较慢;另外这些节点排列很不规则(往往呈疏、紧、疏、紧、……分布),并随测点位置不同而变化,使正演计算很不方便。

本文采用双网格系统来进行横向网格的剖分,用大网格反映地下电性变化和测深点的位置,小网格进行实际有限元数值计算,从而很好地解决了横向网格剖分。具体做法如下(参见图 2)。

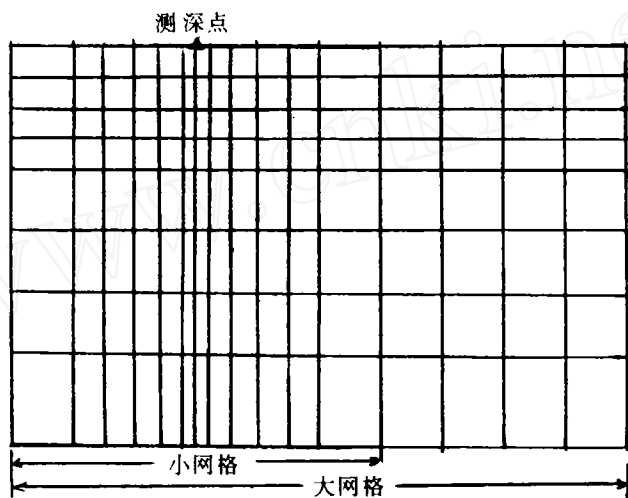


图 2 大小网格剖分示意图

等间距(如 10m, 两侧可根据实际测深点位置适当放宽)剖分大网格,确定测深点位置。网格中各单元的电阻率,在正演时按模型填入;反演时则根据反演结果自动填入。其中每个测深点控制下方几个水平网格单元。

小网格是用于有限元数值计算的,它的纵向剖分与大网格相同,正演时将小网格的中心逐个移到大网格的测深点上,然后根据大网格的电性分布自动给小网格各单元的电阻率赋值,再进行有限元数计算。

3.2 纵向网格的剖分

在纵向上,大小网格的剖分是相同的,但由于从公式(3)得到的预测模型各个测深点下方电性层厚度每一次都不相同,因此正演前尚需计算设定网格各单元上的电阻率值,公式如下

$$\rho_i = \frac{\sum h_k}{\sum s_k}$$

式中, ρ_i 为测深点下第 i 层网格单元上的电阻率, $\sum h_k$ 和 $\sum s_k$ 则分别为落在该单元深度内预测模型各电性层的厚度和总电导。

4 算例

根据上述方法,作者编制了 Fortran 程序,该程序只要准备各测点观测数据,输入测点位置及每个测点所控制的水平网格单元数,即可自动完成二维反演。

图 3 至 6 给出了四个二维模型的理论测深曲线的反演结果,这些结果都是经 10 至 30 次

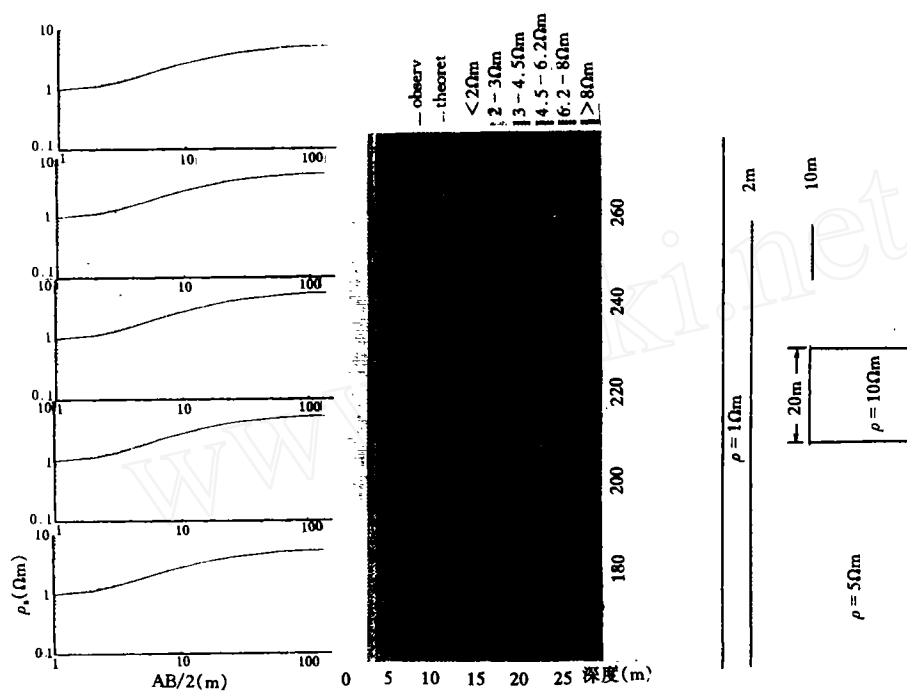


图 4 理论模型二维反演结果

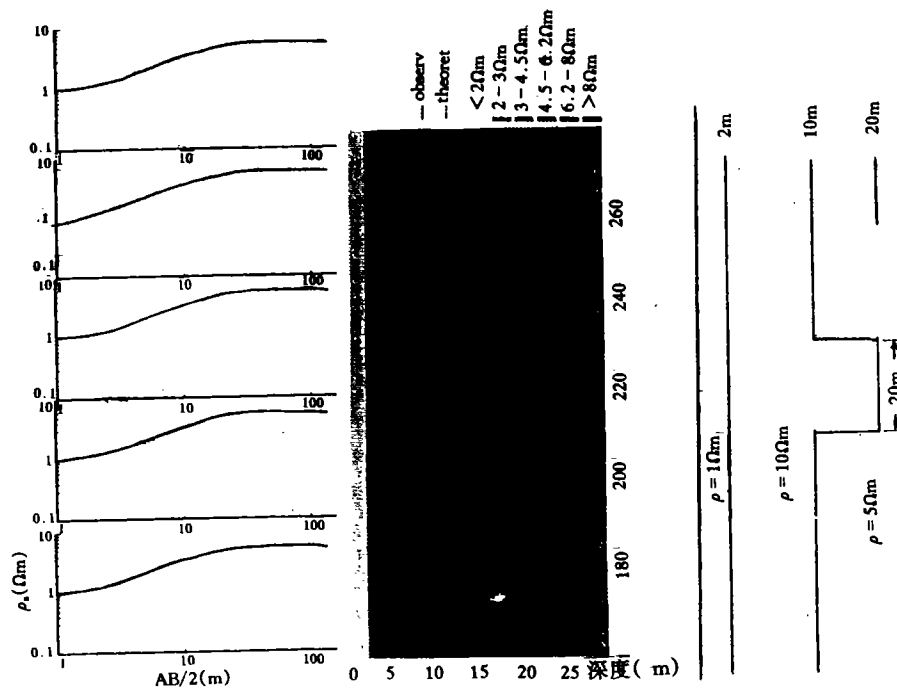


图 3 理论模型二维反演结果

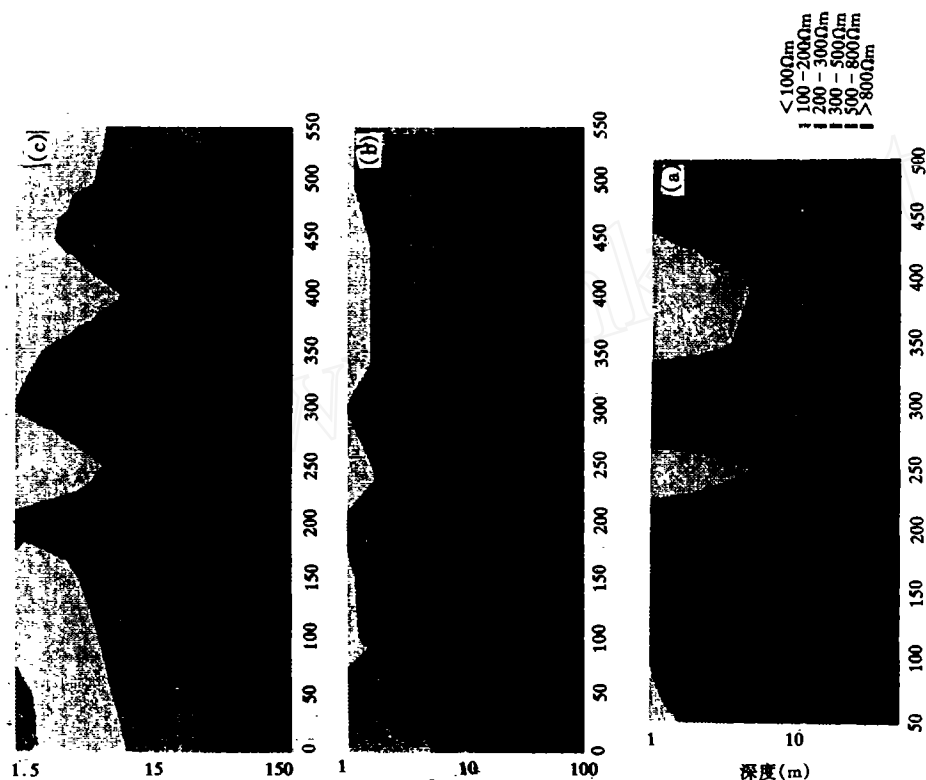


图 6 桂林漓江旁一级耕地上实测电阻率测深反演结果

(a) 二维反演结果层析图, (b) 一维反演结果层析图,

(c) 实测电阻率断面层析图

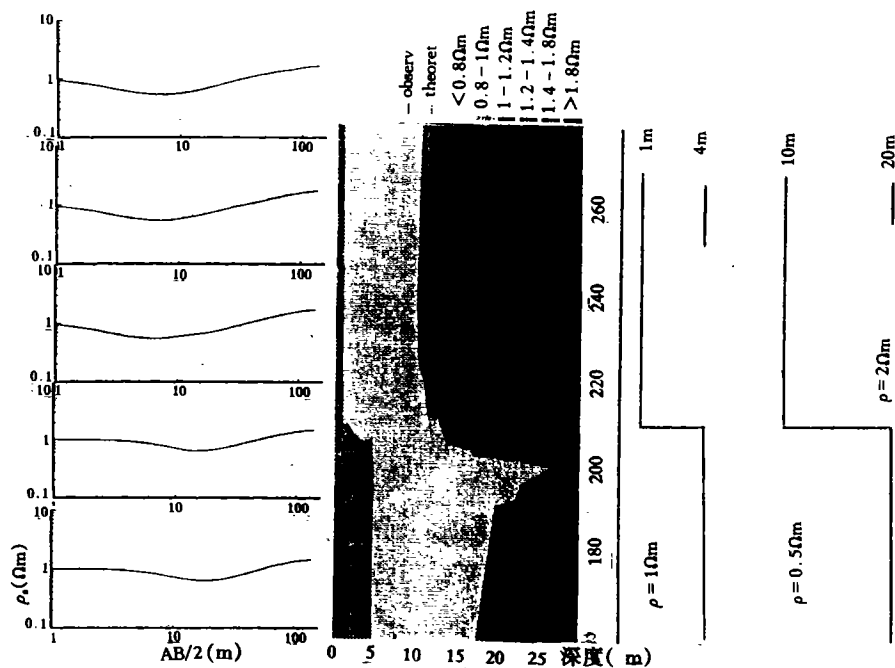


图 5 理论模型二维反演结果

迭代后得到,测深曲线拟合平均相对误差为 1% 左右。各图分上中下三部分,上部为真实模型测深曲线与反演所得模型测深曲线对比图,测点位置对应于 $AB/2$ 轴位置;中部为反演模型的层析图;下部是真实模型。可以看出测深曲线拟合很好,反演模型也与真实模型非常相似。

对实测测深曲线的二维反演,拟合精度相对要差些,这可能是由于实际地质构造并不都是二维的。另外测量误差和近地表电性强烈变化造成测深曲线中数据不真实,使得渐近迭代过程中迭代几次以后误差不再减小,也大大影响了拟合精度。但不管如何,二维反演无论从拟合差还是从反演结果都比一维反演有所改进。图 6a 是对桂林漓江旁一级耕地上所做的实测电测深曲线进行二维反演结果,它的测深曲线拟合精度比一维反演提高了三倍;电性层界面也比一维结果(图 6b)更合乎实际地质,变得光滑,且基岩界面与实测电阻率拟断面层析图中(图 6c)大极距的电性层界面形态相似,这合乎电阻率测深的特性。

作者不赞成 Zohdy 为了提高拟合精度,采用在迭代开始发散时,改用最后一个模型的理论测深曲线重新开始进行反演的方法,认为对反演结果不会有任何改进,但作者赞成在反演前,对测深曲线作适当的圆滑以消去观测误差。

5 结论

本文论述了一种用于解释二维直流电阻率测深的快速反演方法,该方法与 Barker(1992)介绍的方法相比,在近似反演方法和模型修改方法上都有较大改进,它所得出的反演结果在地质上是有价值的,尤其是对理论模型和高质量的实测数据反演效果更好。对含有观测误差和近地表电阻率变化影响的实测数据,反演前进行适当圆滑是可取得,能提高拟合精度。

参 考 文 献

- [1] 阮百尧,电阻率测深曲线解释中的一种新的反演方法,桂林冶金地质学院学报, No. 1, 1994 年。
- [2] 阮百尧,戴世坤,模型对比法及在电阻率测深解释中的应用,桂林工学院学报, No. 2, 1995 年。
- [3] Barker, R, A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface, First Break, Vol. 10, No. 2, 1992.
- [4] Zohdy, AAR, A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner Sounding curves, Geophysics, Vol. 54, No. 2, 1989.

RAPID INVERSION OF TWO - DIMENSIONAL D.C. RESISTIVITY SOUNDING CURVE

Ruan Baiyao, Xu Shizhe

(Institute of Geology and Geophysics, Qingdao University of Oceanology, Qingdao 266003)

Abstract Using the direct inversion formula for one - dimensional D.C. resistivity sounding put forward by the authors in combination with two - dimensional forward solution and asymptotic iterative inversion, this paper has presented a rapid inversion method for two - dimensional D.C. resistivity sounding, which has been proved to be effective in practice.

Key words resistivity sounding, two - dimensional forward solution, asymptotic inversion.

第一作者简介 阮百尧,男,1962 年 1 月出生,浙江上虞人。1995 年 7 月毕业于青岛海洋大学应用地球物理专业,获博士学位。现在桂林工学院从事教学和电磁法研究工作,讲师。已发表 7 篇学术论文。