

# 电阻率测深一维反演的曲线对比法

刘 斌\* 徐世浙

(青岛海洋大学)

## 摘 要

本文对佐迪的电测深自动解释方法进行了改进,采用新的方法建立初始反演模型。将电测深实测曲线转变为纵向电导——深度曲线,由  $dH/dS$  得出电阻率——深度的初始反演模型。通过把初始反演模型得到的视电阻率曲线与真实地电模型的视电阻率曲线进行对比,来校正初始反演模型电阻率。校正后的反演模型的视电阻率曲线与真实模型的视电阻率曲线拟合程度有所提高。如此反复进行多次校正,获得与真实地电模型更接近的最终反演结果。

模型试验和实际例子表明,该方法的反演拟合误差一般均小于 1%,模型试验可达到 0.1%。

## 引 言

电测深资料的自动解释已形成了多种实用方法。佐迪(1989)<sup>[1]</sup>的电阻率测深曲线自动反演技术是一种简单易行的方法,该方法不用进行初始模型假设,根据电测深曲线的特征,假定地层电性层数与实测曲线点数一样多,每层的电阻率值即等于实测曲线对应点上的值,层深度采用对应测点的电极距乘上一个常数来确定。这样建立初始反演模型,然后不断调整初始模型直到实测曲线与原地电模型的理论曲线拟合差减至最小。

佐迪的方法的新颖之处在于初始反演模型的建立,该方法直接由实测视电阻率曲线得到了初始模型,从而不需要进行初始模型的假设。本文中提出的曲线对比方法的思想实际上与佐迪的思想是一致的,所不同的是在建立初始反演模型时采用了新的技巧。将实测的视电阻率( $\rho_s$ )——电极距( $\frac{AB}{2}$ )曲线( $\rho_s$  曲线)转变为纵向电导( $S$ )——深度( $H$ )曲线,根据  $\frac{dH}{dS}$  得出电阻率( $\rho$ )——深度( $H$ )的初始反演模型。采用褶积计算得出初始反演模型的理论测深曲线( $\rho_s'$  曲线)。用  $\rho_s$  曲线与  $\rho_s'$  曲线对比的方法来修改初始反演模型,再作正演计算,如此迭代多次,可获得拟合差很小的反演结果。

模型的试算表明,由于采用上述方法建立的初始反演模型要比直接由视电阻率曲线得到的模型更接近于实际地电断面,因而反演的速度和精度均有所提高。反演结果与原始地电模型拟合程度较好,视电阻率曲线的拟合差可达 0.1% 以下。采用文献[3](佐迪方法的具体实现)的实例进行了计算,得到了优于文献[3]的结果。最后对受钻孔控制的实测数据进行了计算,也取得了较好的效果,曲线拟合差达到 1% 以下。

\* 收稿日期:1994-04-27 地址:山东省青岛市鱼山路 5 号(邮政编码:266003)

## 一、电测深曲线的初步反演

图 1 是  $\rho_1 < \rho_2$  的三层地电模型的三条电测深理论曲线。

这三条曲线对应的地电模型的第一、二层的电阻率和深度相同,但第三层电阻率分别为  $\infty$ 、 $\rho_2$  和 0。这三条曲线在图上的“×”标号点处附近分开。当电极距小于“×”所对应的  $AB/2$  时,三条曲线基本重合,这是因为,第一、二层的电阻率和厚度相同,电测深曲线主要反映第一、二层的影响;当电极距大于“×”所对应的  $AB/2$  时,电测深曲线分叉,这是第三层起作用的结果。可以预料,第三层电阻率取任意值时,曲线分叉点位置也在“×”号点附近。“×”所对应的电极距为  $AB/2 = 33\text{m}$  左右,大致与第一、二层的总厚度相当;“×”所对应的视电阻率值  $\rho_s = 23\Omega\text{m}$ ,这与由纵向电导  $S$  得出的第一、二层的平均电阻率:

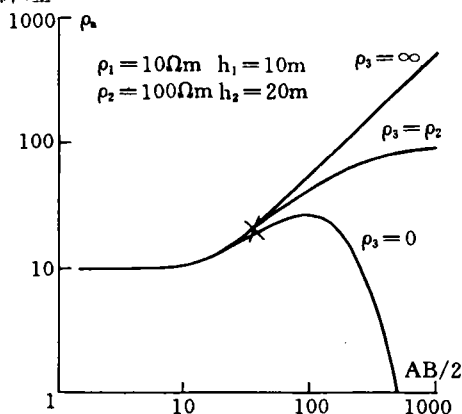


图 1 三层模型 ( $\rho_1 < \rho_2$ ) 理论曲线

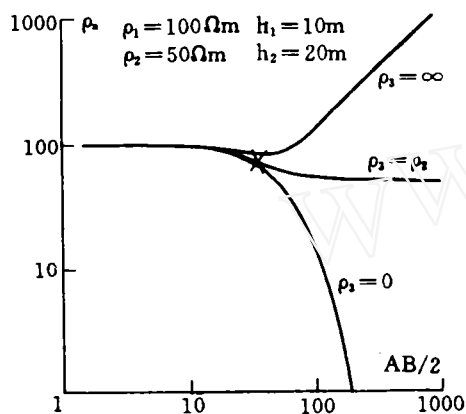


图 2 三层模型 ( $\rho_1 > \rho_2$ ) 理论曲线

$$\rho = \frac{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}} = 25.9\Omega\text{m} \quad \text{相当。}$$

图 2 是  $\rho_1 > \rho_2$  情况的三层地电模型的三条电测深曲线。图上“×”号点对应的电极距  $AB/2 = 34\text{m}$ ,与第一、二层的总厚度相当,视电阻率 ( $\rho_s = 73\Omega\text{m}$ ) 也与由纵向电导得出的第一、二层平均电阻率 ( $60\Omega\text{m}$ ) 较接近。

图 3 是  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$  的四层地电模型的三条电测深曲线,图 4 是  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$  的四层地电模型的电测深曲线。它们都有相同的规律。

图上“×”号对应

的电极距  $\frac{AB}{2} = 44\text{m}$  左右,与第一、二、三层的总厚度 ( $45\text{m}$ ) 相当,“×”号处对应的视电阻率也均与第一、二、三层的平均电阻率相接近。

以上结果给我们一个启示:电极距  $\frac{AB}{2}$  所对应的视电阻率与深度  $\frac{AB}{2}$  以上地层的平均电阻率存在一定的相应关系,而与该深度以下的地层的电阻率关系较小。所以由此我们可得出以下一个简便的电测深曲线反演方法。

1. 以电极距  $\frac{AB}{2}$  作为反演深度
2. 由该电极距所对应的  $\rho_s$ , 可得出深度  $H = \frac{AB}{2}$  以上地层的纵向电导

$$S = \frac{H}{\rho_s} \quad (1)$$

3. 根据  $\rho = \frac{dH}{dS}$ , 得出该深度的电阻率, 由此得到的电阻率——深度关系作为初始反演结果

图 5 给出均匀层状模型的初始反演结果与原始地电模型的对比。初始反演结果反应

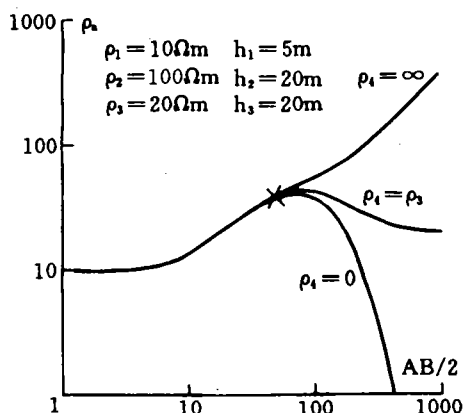


图 3 四层模型 ( $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ ) 理论曲线

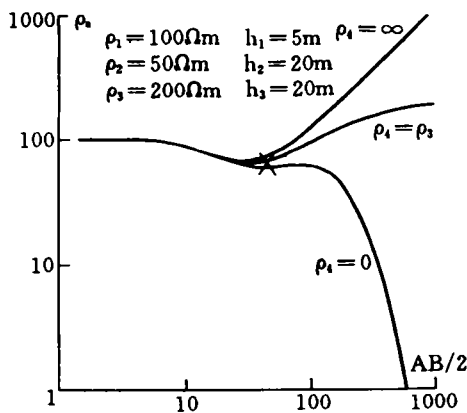


图 4 四层模型 ( $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ ) 理论曲线

原地电模型的电阻率随深度变化的基本特征, 可以作为分析地下电性结构的初步依据。但是, 初始反演结果与原地电模型还有一定的差别, 因为, 本反演方法的依据——电极距  $\frac{AB}{2}$  对应的视电阻率, 相当于深度  $\frac{AB}{2}$  以上的地层的平均电阻率——只是一种近似。为了改善反演结果, 需要对初始反演结果进行校正。将初始反演结果曲线与测深曲线进行对比, 图 5 中可以看出, 初始反演结果电阻率变化幅度明显大于测深曲线视电阻率的变化幅度, 更接近真电阻率的变化形态; 初始反演电阻率——深度曲线的变化比测深曲线提前, 向真电阻率——深度曲线趋近, 但仍然滞后于真电阻率——深度曲线。因此, 在对初始反演模型进行校正时, 应将初始反演结果向左平移, 以使初始模型与原始地电模型处于最接近的位置。

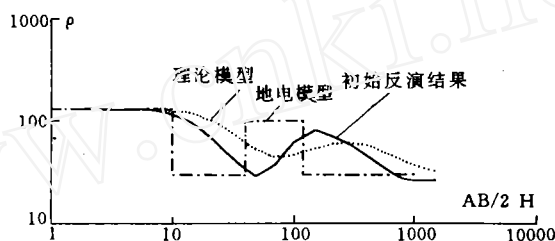


图 5 电测深曲线初始反演结果

## 二、曲线对比法反演

在最优化反演方法中, 根据最小二乘原理对初始反演结果进行校正, 这需要大量的计算工作, 而且存在解的不稳定性等问题。这里我们采用曲线对比法<sup>[1]</sup>对初始反演结果进行校正, 计算速度快, 不存在解的不稳定问题。根据模型试算表明, 曲线对比法大大改善了初始反演结果, 获得了与原始地电模型更为符合的结果。

图 6a 中的  $\rho_a$  曲线代表实测曲线, 图 6b 中的虚线是由实测曲线按上节方法得到的初始反演结果,  $\rho^{(1)}$  是根据佐迪的方法由初始反演结果得到的初始反演模型, 即将初始反演结果划分成与实测点数目一样多的层状模型, 并将各层对应的深度乘上一个常数 (这里取 0.5), 各层的电阻率值即采用初始反演结果所对应的电阻率值 (而不是用实测的电阻率值), 从而使初始反演模型更接近原地电模型的电性分布。用褶积计算方法对所建立的多

层初始反演模型作正演计算,计算出的电测深曲线如图 6a 中的  $\rho'_s$  曲线所示。 $\rho_s$  与  $\rho'_s$  的差

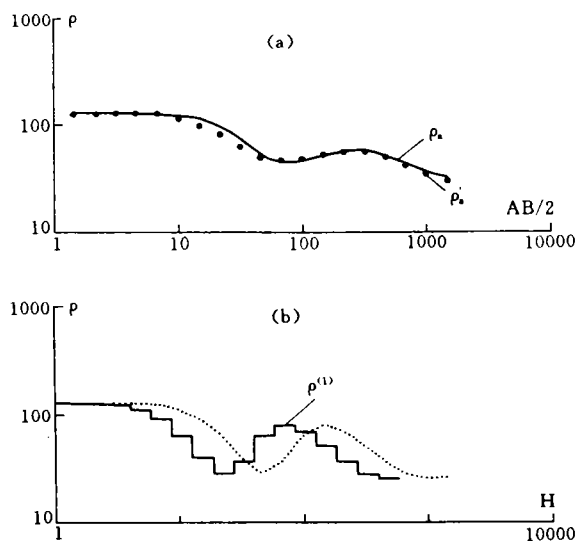


图 6 曲线对比法反演

别显示实际地电模型与初始反演模型的差别,因此要对初始反演模型进行校正。如果在某个电极距  $\frac{AB}{2}$  上,与之对应的深度上的  $\rho'_s$  比  $\rho_s$  小,则认为在该对应深度上的初始反演电阻率较原真电阻率偏小,应将初始反演电阻率值适当地放大;反之,如  $\rho'_s$  比  $\rho_s$  大,则将初始反演电阻率缩小,其校正公式为:

$$\Delta\rho^{(1)} = \rho^{(1)} \left( \frac{\rho_s}{\rho'_s} - 1 \right) s \quad (2)$$

式中: $s$  是步长系数。由初始反演模型的电阻率  $\rho^{(1)}$  加上第一次校正量  $\Delta\rho^{(1)}$ ,得第二次反演电阻率:

$$\rho^{(2)} = \rho^{(1)} + \Delta\rho^{(1)} \quad (3)$$

由  $\rho^{(2)}$  再计算新的  $\rho'_s$  曲线,与  $\rho_s$  曲

线进行对比,求得第二次校正量  $\Delta\rho^{(2)}$ ,得到第三次反演电阻率。按照下式迭代多次:

$$\rho^{(k+1)} = \rho^{(k)} + \Delta\rho^{(k)} \quad (4)$$

式中: $\rho^{(k)}$  和  $\rho^{(k+1)}$  分别是第  $k$  次和第  $k+1$  次反演电阻率,  $\Delta\rho^{(k)}$  是第  $k$  次校正量。迭代进行到拟合误差小于一给定值为止。 $\rho_s$  与  $\rho'_s$  的拟合误差按下式计算:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\rho_s)_i - (\rho'_s)_i}{(\rho_s)_i + (\rho'_s)_i} \cdot 2 \times 100\% \quad (5)$$

其中: $n$  是用于计算误差的电极距的数目; $(\rho_s)_i$  和  $(\rho'_s)_i$  分别是第  $i$  个电极距的  $\rho_s$  和对应深度上的  $\rho'_s$ 。在迭代过程中拟合差  $\varepsilon$  逐渐减小,图 7 是图 6 的模型的电阻率曲线拟合误差与迭代次数的关系曲线。一般来说,迭代几十次, $\varepsilon$  可小于 0.1%。

图 8 中画出了曲线对比法的反演结果(根据文献[3]的模型),它大大地改善了初始反演结果,与原地电模型更为吻合。最终反演模型与原地电模型的电性层电阻率的相对误差为 9.2%(文献[3]是 13.4%)。

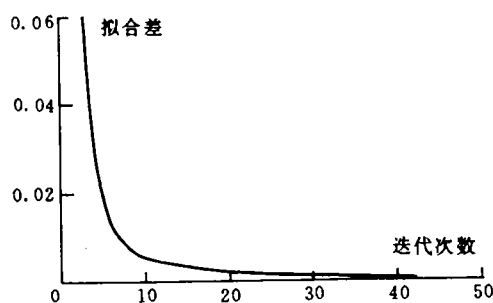


图 7 拟合差与迭代次数的关系

### 三、实 例

图 9 是某地区用于咸淡水界面划分的电测深曲线以及钻探结果,折线是用曲线对比法反演的结果,图中给出了用其它方法得到的反演解释。曲线对比法反演迭代十几次,拟合差即达 1%,由图中可见反演结果电阻率变化最大的位置与钻探资料的分层基本吻合。

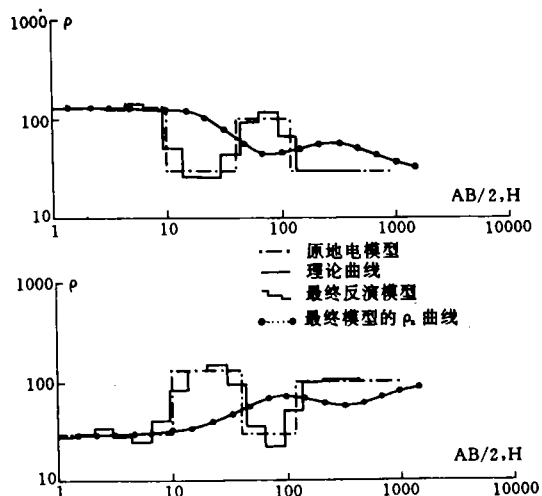


图 8 模型反演结果

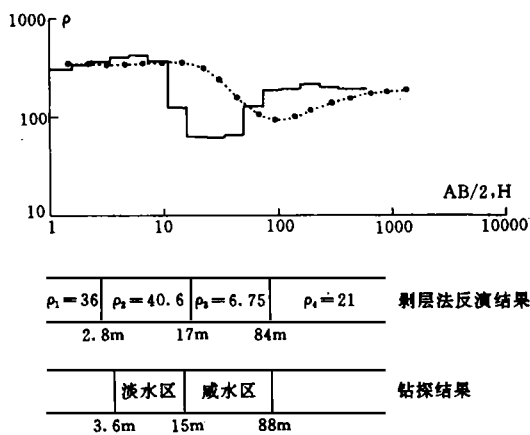


图 9 反演实例

## 参 考 文 献

- [1] Zohdy, A. A. R., A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves, *Geophysics*, Vol. 54, No. 2, 1989.
- [2] R. Barker, A simple algorithm for electrical imaging for subsurface, *First Break*, Vol. 10, No. 2, 1992.
- [3] 陈达, 1992, 用多层等效模型进行电测深曲线的自动解释, *物探化探计算技术*, Vol. 14, No. 1.

# THE CURVE COMPARING METHOD OF ONE-DIMENSIONAL INVERSION FOR ELECTRICAL SOUNDING

Liu Bin Xu Shizhe

(Ocean University of Qingdao)

## Abstract

This paper presents a new method of inversion for electrical sounding based on the Zohdy method. The apparent resistivity curve is transformed to the conduction (S)—depth (H) curve. According to the  $dH/dS$ , a resistivity—depth curve can be got as the primary model for inversion. Then, the resistivities of this model are corrected by comparing the curve of apparent resistivities calculated from this model with that from the true model. The apparent resistivity curve calculated from the corrected model is more fitting to the curve from the true model. The final inversion model is obtained by repeating the correcting process.

It is more similar to the true model. The model tests and practical examples show that the misfit of the apparent resistivity—depth curves between the final inversion model and the true model by this method is less than 1%, and the misfit of the model test can be 0.1%.

【作者简介】刘斌,男,1967年生,安徽省六安市人。毕业于长春地质学院应用地球物理系,1993年获硕士学位。现在青岛海洋大学地质地球物理研究所从事科研工作。今后主攻方向是计算地球物理及地理信息系统应用与开发。