

直流电阻率测深中对转换函数 曲线的直接反演法*

阮百尧 葛为中

(桂林工学院资源与环境工程系, 桂林 541004)

摘 要

根据三极和对称四极直流电阻率测深的转换函数曲线性质,用大地电磁测深中 BOSTICK 相同的方法,导出对电阻率转换函数曲线的直接反演公式,经过对 6 个模型的电阻率转换函数曲线进行反演检验,该公式虽能近似反映地电断面情况,但误差较大.本文对视电阻率测深曲线的直接反演公式进行改进,得到了另外两种精度较好的直接反演公式,同时给出了一些例子.

关键词 电阻率测深,转换函数,直接反演.

1 引 言

在三极和对称四极装置直流电阻率测深中,由于视电阻率测深曲线上升和下降时的渐近规律不尽相同,所以一直没有像大地电磁测深中 BOSTICK 那样的直接反演方法.作者根据 Dar-Zarrouk 曲线在电阻率随深度变化不大的情况下与视电阻率测深曲线基本重合这一结论^[1],导出视电阻率测深曲线解释中的直接反演方法^[2,3].但该方法在视电阻率测深曲线高阻上升和低阻下降时使用不同的直接反演公式,却不如大地电磁测深中的 BOSTICK 反演方法简单.为了解决这个问题,本文根据电阻率转换函数曲线能正确地反映地下电性层变化、高阻与低阻时的渐近规律完全相同的性质,用大地电磁测深中 BOSTICK 相同的方法导出对电阻率转换函数曲线的直接反演方法.在此基础上结合电阻率测深曲线的直接反演公式,给出了另外两种精度较好的直接反演公式.

2 电阻率转换函数的直接反演公式

在电阻率测深正演计算中,通常是先用递推公式求得电阻率转换函数,然后再用数值滤波转换为视电阻率;而在电阻率测深的反演计算中,为了节省计算工作量,又常把视电阻率测深曲线转换成转换函数,然后对转换函数曲线进行反演解释.因此,转换函数在电阻率测深的正、反演计算中非常重要.对于三极和对称四极梯度装置,转换函数与视电阻率的关系

* 国家自然科学基金资助项目(49604060).

本文 1998-12-07 收到修定稿.

为^[4]

$$\begin{cases} T(\lambda) = \int_0^{\infty} \frac{\rho_s(r)}{r} J_1(\lambda r) dr, \\ \frac{\rho_s(r)}{r} = \int_0^{\infty} T(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda, \end{cases} \quad (1)$$

式中 $T(\lambda)$ 为电阻率转换函数, $\rho_s(r)$ 为视电阻率, r 为供电电极距 $\overline{AB}/2$, λ 为参变量, $J_1(\lambda r)$ 为一阶贝塞尔函数。

为建立对转换函数曲线的直接反演法, 我们首先研究转换函数曲线反映地下电性层变化的情况。图 1 为 3 层水平地电断面上对称四极测深电阻率转换函数曲线。其中 $\rho_i, h_i (i=1, 2, 3)$ 分别代表各层的电阻率和厚度, 地电模型的参数见图注。由图可见, 随着 $1/\lambda$ 值由小变大, 转换函数 T 的值由第 1 层的电阻率 ρ_1 逐渐往 ρ_2 方向增大(实线)或减小(虚线)然后又下降(实线)或增大(虚线)趋于 ρ_3 , 与视电阻率随供电电极距 $\overline{AB}/2$ 的变化规律相似, 也即转换函数 T 相当于视电阻率 ρ_s , 而 $1/\lambda$ 相当于供电电极距 $\overline{AB}/2$, 该方法比视电阻率测深曲线优越的是, 当两个模型的层参数与 ρ_1 轴呈镜像对称时, 它们的转换函数曲线也呈镜像对称, 也即转换函数 T 在高阻上升和低阻下降时的渐近规律完全相同。由此, 我们可仿照大地电磁测深中 BOSTICK 反演法^[1]导出的方法来推导电阻率测深的直接反演方法。

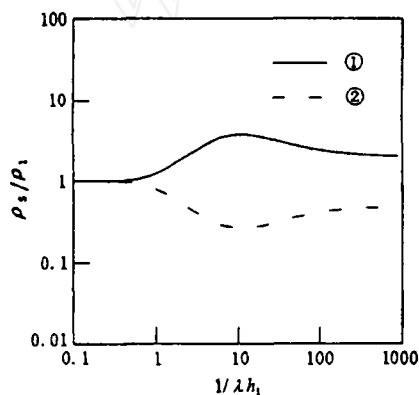


图 1 3 层地电断面上转换函数曲线
Fig. 1 The transform function curve of 3 layer model

① $\rho_2 = 10\rho_1, \rho_3 = 2\rho_1, h_2 = 5h_1$;
② $\rho_2 = 0.1\rho_1, \rho_3 = 0.5\rho_1, h_2 = 5h_1$

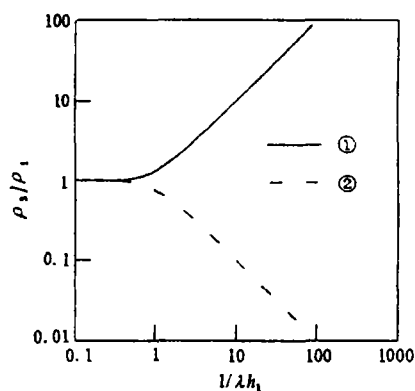


图 2 2 层地电断面上转换函数曲线
Fig. 2 The transform function curve of 2 layer model

① $\rho_2 \rightarrow \infty$; ② $\rho_2 \rightarrow 0$

考虑 2 层水平地电断面的 2 种极端情况: 第 1 层的电阻率为 ρ_1 , 厚度为 h_1 , 第 2 层的电阻率则分别为 ∞ 或 0, 它们的转换函数曲线如图 2 所示。可以肯定其他 2 层水平地电断面的转换函数曲线将在这 2 条转换函数曲线之间。由 2 层转换函数公式^[4]

$$T(\lambda) = \rho_1 \frac{1 + K_{12} e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_{12} e^{-2\lambda h_1}}, \quad (2)$$

其中 $K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ 为反射系数, 可得到当 $\rho_2 \rightarrow \infty$ 或 $\rho_2 \rightarrow 0$ 时 2 条转换函数曲线在双对数坐标

上 $1/(\lambda h_1) \rightarrow \infty$ 时的尾支的渐近线分别为

$$\begin{cases} \lg T = \lg \rho_1 + \lg [1/(\lambda h_1)], & \rho_2 \rightarrow \infty, \\ \lg T = \lg \rho_1 - \lg [1/(\lambda h_1)], & \rho_2 \rightarrow 0, \end{cases} \quad (3)$$

它们的相交处 $1/\lambda = h_1, T = \rho_1$. 由于 $1/\lambda = h_1$ 时的实际转换函数值 T 与上述两条尾支渐近线交点处的 T 值非常接近, 因此可以得到下面的直接反演公式

$$\begin{cases} h_1 = 1/\lambda, \\ \rho_1 = T, \end{cases} \quad (4)$$

式中 T 为转换函数在 $1/\lambda$ 处的值, h_1 和 ρ_1 分别为该点所反映的模型的深度和电阻率. 这就是本文导出的第 1 种对电阻率测深转换函数的直接反演公式. 用这个公式对 6 个模型的电阻率测深转换函数曲线进行了反演, 反演结果见图 3 中曲线②. 从图中可见, 与实际模型

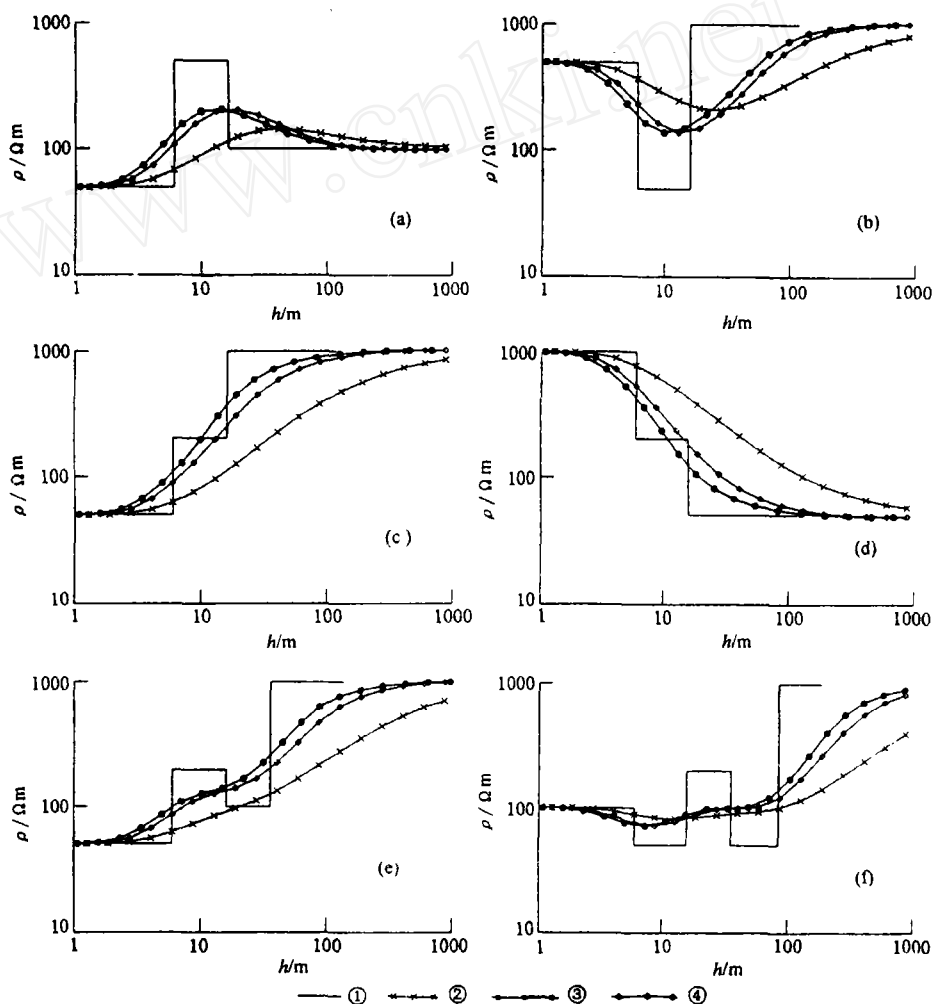


图 3 理论模型电阻率转换函数曲线的反演

①实际模型; ②第 1 种方法反演结果; ③第 2 种方法反演结果; ④第 3 种方法反演结果.

Fig. 3 Inversion results for the theoretical data of the resistivity transform function

(实线)相比,所得模型的电阻率随深度变化近似反映了地电断面的情况,但误差较大,因此需要改进.

3 改进后的直接反演方法

由于转换函数 T 与视电阻率相当,而 $1/\lambda$ 与供电电极距相当,又由于文献[2]中导出的电阻率测深的直接反演公式所得电阻率参数与实际模型比较接近.因此,我们考虑用文献[2]中提出的电阻率公式形式来修改公式(4)中的电阻率参数,于是得到第2种对直流电阻率测深转换函数曲线的直接反演方法

$$\begin{cases} h_i = 1/\lambda_i, \\ \rho_i = T_i \sqrt{\frac{1-d_i}{1+d_i}}, \end{cases} \quad (5)$$

式中 $d_i = \left(\frac{\partial \lg T}{\partial \lg \lambda} \right)_i$ 为双对数坐标上转换函数曲线第 i 点的梯度, h_i 和 ρ_i 分别为该点所反映的模型的深度和电阻率.由于转换函数高阻上升和低阻下降时的渐近规律相同,因此曲线上升和下降时的公式相同.用该方法对上面的6个模型的视电阻率测深曲线的反演结果见图3中曲线③.可见,此时所得电阻率-深度曲线比公式(4)有了较大的改进.

实际上深度公式也可套用文献[2]中的公式,因此又可得到第3种对直流电阻率测深转换函数曲线的直接反演方法

$$\begin{cases} \Delta h_i = (1/\lambda_i - 1/\lambda_{i+1}) \sqrt{1-d_i^2}, \\ \rho_i = T_i \sqrt{\frac{1-d_i}{1+d_i}}, \end{cases} \quad (6)$$

式中, Δh_i 为模型电阻率为 ρ_i 时的层厚度,因此该层的层底深度 h_i 为

$$h_i = \sum_{j=1}^i \Delta h_j.$$

用这种方法对上面的6个模型的视电阻率测深曲线的反演结果见图3中曲线④,反演效果又有所改进.

4 实例

为了检验本文提出的反演方法,取广西柳州市柳江边一些钻孔上的直流电阻率测深曲线进行直接反演.测深点处地形平坦,地层自上而下分布为:杂填土、粉质粘土、含粘性土粉砂、圆砾和白云质灰岩(参见图4纵坐标处的钻孔柱状图),由于地下水位较浅,所以对应的电阻率从上而下呈高-底-高-底-高分布.各测深点的实测视电阻率测深曲线见图4各图中的虚线.从图中可见,由于各点第1层厚度比最小供电电极距(9m)要小的多,而第4层厚度又很小,再加上旁侧影响,实测视电阻率测深曲线并不呈 HKH 型.

将视电阻率测深曲线转换为电阻率转换函数曲线,然后对转换函数曲线用第3种反演

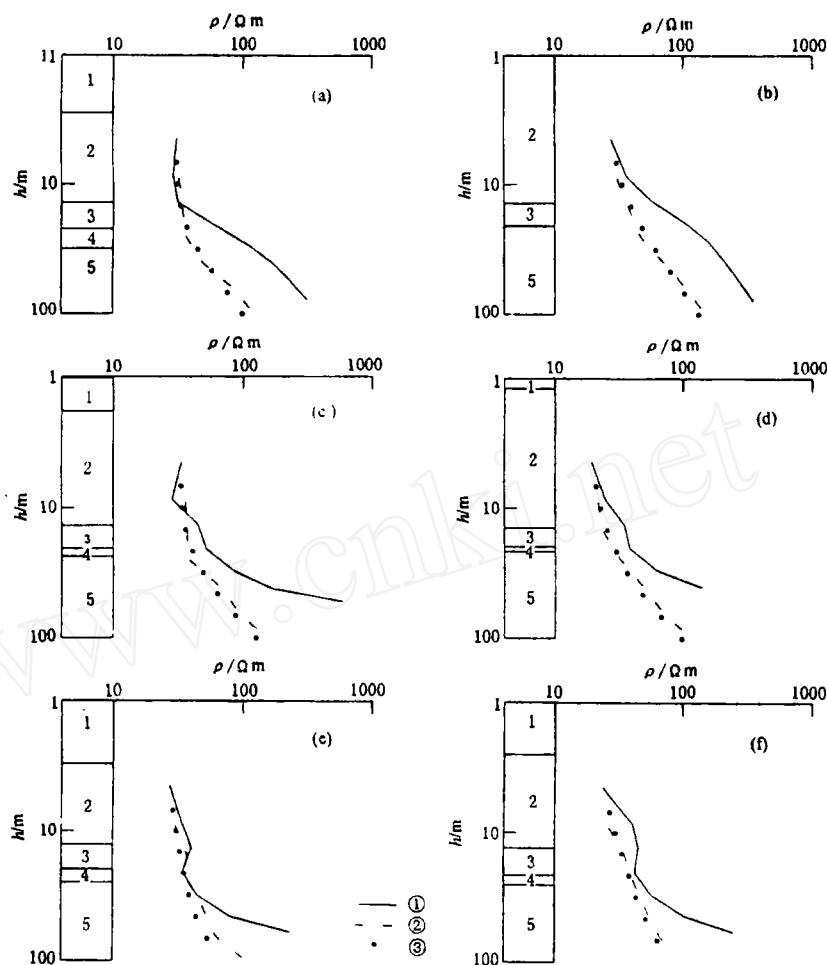


图 4 实测视电阻率测深曲线、反演结果及钻孔柱状图
 钻孔柱状图: 1 杂填土; 2 粉质粘土; 3 含粘性土粉质砂; 4 圆砾; 5 白云质灰岩;
 ① 反演结果; ② 实测视电阻率测深曲线; ③ 反演结果的视电阻率测深曲线.

Fig. 4 The apparent resistivity curve, inversion results and bore log in some sounding points

公式进行直接反演, 反演所得的电阻率-深度曲线见图 4 中实线. 与图中的钻孔柱状图相比, 反演结果基本反映了各地层的位置及电阻率变化情况. 图 4 中还给出了由反演结果正演计算所得的视电阻率曲线(见图中圈点), 可以发现它与实测视电阻率曲线(图中虚线)基本拟合.

5 结 论

根据电阻率转换函数曲线性质得到了 3 种直接反演方法, 从理论和实测视电阻率曲线的反演效果看: 第 1 种直接由转换函数曲线的渐近线性性质导出的方法误差较大, 而改进后的两种方法反演效果较好, 可用于野外即时反演和为精确反演提供初始模型. 与文献[2]、[3]

中的反演方法相比,本文所提出的反演公式,在反演时需先将视电阻率测深曲线转换为电阻率转换函数曲线,增加了即时反演或直接反演的工作量;但是当它为精确反演方法提供初始模型,而这种精确反演又是拟合转换函数 T 时,使用本文方法就比较方便了。

参 考 文 献

- 1 陈乐寿,王光镔编. 构造电法勘探,武汉:中国地质大学出版社,1991. 36—38,110—112
CHEN Le-Shou, WANG Guang-E. Structural Electrical Survey (in Chinese) Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991. 36—38, 110—112
- 2 阮百尧. 电阻率测深解释中的一种新方法. 桂林冶金地质学院学报, 1994, 13(1): 76—84
RUAN Bai-Yao. A new inversion method in resistivity sounding. *Journal of Guilin College of Geology* (in Chinese), 1994, 13(1): 76—84
- 3 阮百尧,徐世浙. 直流电阻率测深曲线解释中的直接反演法. 物探化探计算技术, 1996, 18(2): 108—112
RUAN Bai-Yao, XU Shi-Zhe. A direct inversion method in the interpretation of electrical sounding curves. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 1996, 18(2): 118—124
- 4 傅良魁主编. 应用地球物理教程——电法、放射性、地热. 北京:地质出版社, 1991. 89—93
FU Liang-Kui. Applied Geophysics—Electrical Survey, Radioactivity Survey and Geothermal Prospecting (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1991. 89—93

A DIRECT INVERSION METHOD FOR TRANSFORM FUNCTION CURVE IN VERTICAL ELECTRIC SOUNDING

RUAN BAI-YAO

GE WEI-ZHONG

(Dept. of Resource and Environmental Engineering, Guilin Institute of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract

According to the natures of the transform function in vertical electric sounding, this paper derives a direct inversion method for transform function curve by means of the same method as BOSTICK in magnetotelluric sounding. To improve the inversion precision, we combine this method with the direct inversion method for electric sounding curve and get another two inversion methods for transform function curve. Some examples are given in this paper.

Key words Vertical electric sounding, Transform function, Direct inversion.

作者简介 阮百尧,男,1962年生,1982年毕业于中南矿冶学院地质系应用地球物理专业,1985年在该校获硕士学位,1985年在青岛海洋大学获博士学位.现为桂林工学院教授.主要从事电磁场模拟和反演成像的研究.