

## 二维直立岩层电阻率测深异常曲线的某些特征

刘象勤 李纯志

(桂林冶金地质学院)

**摘要** 本文以直立岩层(岩脉)地电体为例,论述视电阻率测深曲线的特点,讨论工作方法 and 资料的解释。

在寻找地质构造和解决水文工程地质问题时,人们常常选择对称四极电阻率测深法,利用 $\rho_s$ 测深曲线和 $\rho_s$ 等值断面图来解释有关的地质现象,判断地电体模型和产状。但是由于对二维地电体视电阻率测深正演曲线的特点了解不多,工作方法技术和资料解释尚未离开水平层测深的范围。例如布线方向只考虑地形条件或任意选择,而没有考虑地电条件,资料解释仍应用水平层的理论。这样必然造成地质判断上的谬误。为了在二维直立岩层地电体上正确地应用电阻率测深法,我们研究了直立岩层上电阻率测深的异常特点。

### 1 计算公式概述

对于图1所示的具有多个直立岩层的二维地电断面,地面上点电源场 $A(I)$ 中任意一点 $M$ 处的电位表达式(1),可根据解拉普拉斯方程求得:

$$V_{ij} = \int_0^\infty [C_{ij}e^{-mz} + a_{ij}e^{-mz} + b_{ij}e^{mz}] J_0(mr) dm \quad (1)$$

式中 $i$ 为点电源所在介质的序号, $j$ 为观测点所在介质的序号。 $i$ 和 $j$ 的变化范围为 $1 \sim n+1$ ;  
 $a_{ij}$ 和 $b_{ij}$ 为待定系数,可通过边界条件求出;  
 $C_{ij}$ 为一常数,在半空间条件下为:

$$C_{ij} = \begin{cases} \frac{I\rho_0}{2\pi} & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

$J_0(mr)$ 为零阶贝塞尔函数。

求得各电位值后,则

$$\rho_s = K \frac{\Delta V_{MN}^{AB}}{I} \quad (2)$$

$$\Delta V_{MN}^{AB} = (V_M^A - V_N^A) + (V_M^B - V_N^B)$$

式中 $V_M^A$ 、 $V_N^A$ 、 $V_M^B$ 、 $V_N^B$ 分别为 $A$ 和 $B$ 点源在 $M$ 和 $N$ 观测点的电位; $K$ 为装置系数。

对于图2(a)所示的浮土覆盖下的多个直立岩层的二维地电断面,目前尚未有严格的解析解,不能获得测深理论曲线,在此,我们引用文献〔2〕所提出的一种近似算法——代替层等效电阻率法。该法所计算的结果经与某些实验和理论曲线对比,证明有很好的近似性,能满足生产要求。现我们简单说明这一计算方法的原理。

若将图2(a)中的直立岩层接触面向上延伸至地面,则构造如图2(b)所示的具有

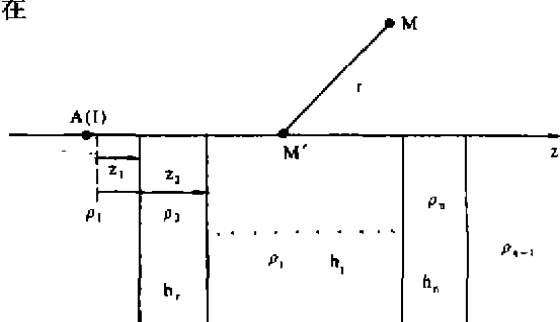


图 1

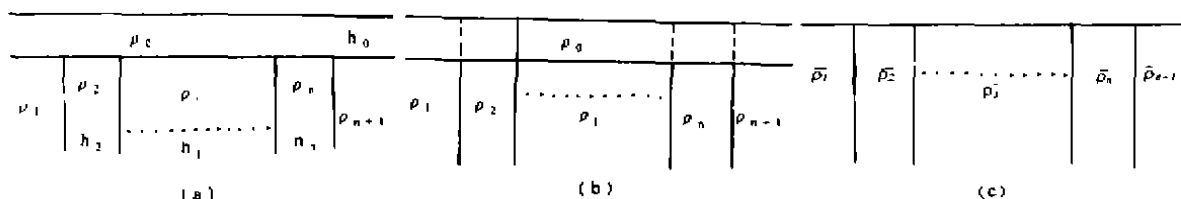


图 2

水平分层的 $n+1$ 个块段的等效断面，即图 2(b) 与图 2(a) 完全等效。令每块段的等效电阻率为 $\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2, \dots, \bar{\rho}_{n+1}$ 。于是图 2(b) 又变成图 2(c)，显然它与图 1 形式完全相同，即电性层参数为等效电阻率的多个直立岩层接触的二维断面，于是第 $j$ 块段的代替层等效电阻率为相应极距条件下水平层视电阻率，即：

$$\bar{\rho}_j = r^2 \int_0^\infty T_j^2(m) J_1^2(mr) m dm \quad (3)$$

式中  $T_j^2(m)$  为第 $j$ 块段水平分层在地面上的电阻率转换函数，它只与第 $j$ 块段内水平分层的层参数有关，而与观测点的位置无关； $J_1(mr)$  为一阶贝塞尔函数； $r$  为  $AB/2$  极距。求出各块段的等效电阻率后，则再利用 (1) 和 (2) 便求得相应极距下的  $\rho_s$  值。

值得指出的是， $\bar{\rho}_j$  并非一个常数，除与图 2(a) 中的层参数有关外，还与极距有关。即只有在层参数不变，极距也不变时， $\bar{\rho}_j$  才是常数。

## 2 $\rho_s$ 测深曲线的性态

图 3 为两个直立分界面上计算三个不同布极方向的对称四极测深曲线。这些曲线具有如下特点：

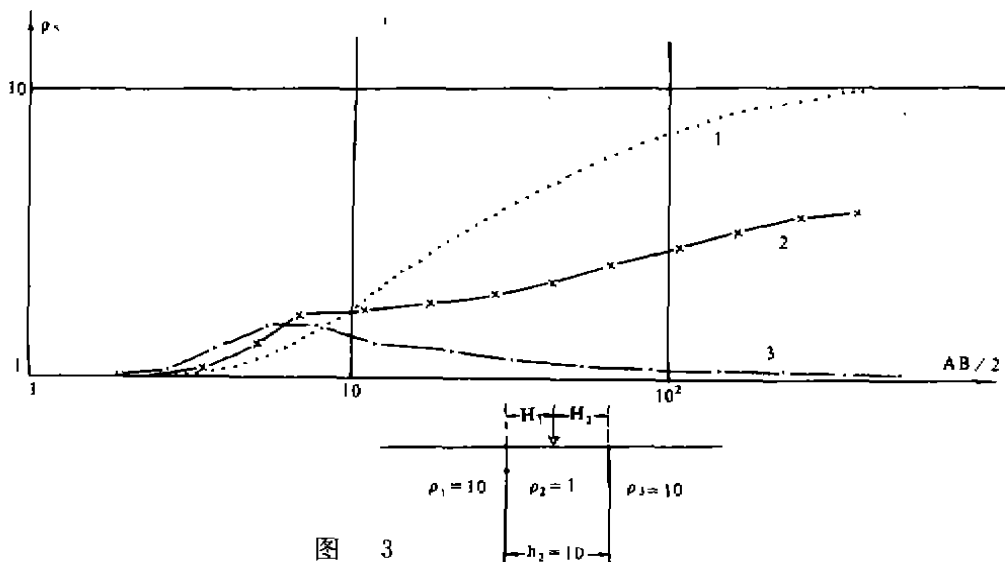


图 3

2.1 从整条曲线看，布极方向与分界面垂直和成 $45^\circ$ 斜交时的测深曲线具有三层或多于三层曲线的性质，但与水平层曲线存在一定的差别，即当供电电极 A 或 B 跨过分界面时， $\rho_s$  曲线出现明显的突变，故很难找到与之拟合的水平层电阻率测深曲线；平行分界面布极的  $\rho_s$  曲线则具有水平层曲线的性质，与水平两层曲线 (G 型  $\mu = 10$ ) 完全一样，可见布极方向不同时， $\rho_s$  曲线异常的形态差别很大，在某一极距范围内， $\rho_s$  异常值会相差很大。在实际工作中要考虑这一点。

2.2 三条曲线的前支 $\rho_s$ 趋于测深点所在介质的电阻率, 即 $\rho_s \rightarrow \rho_2$ 。当 $AB/2 > 10$ 时, 三条曲线开始分开, 且随 $AB/2$ 增大, 曲线差别越来越大;  $AB/2 \gg h_2$ 时,  $\rho_s$ 趋于某一渐近值, 可以证明:

首先我们看到, 图3中的测深记录点位于 $\rho_2$ 层的中点, 对于平行布极和垂直分界面布极情况, 则有 $\rho_s^A = \rho_s^B = \rho_s$ 。

(1) 平行分界面布极

$$\rho_s(\theta = 0^\circ) = \frac{2\pi r^2}{I} \left( -\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{Z=0} \quad (4)$$

将(1)式代入上式, 并注意此时 $i = j = 2$ , 则

$$\begin{aligned} \rho_s(\theta = 0^\circ) &= \frac{2\pi r^2}{I} \int_0^\infty (c_{22} + b_{22} + a_{22}) J_1(mr) m dm \\ &= r^2 \rho_2 \int_0^\infty (1 + b'_{22} + a'_{22}) J_1(mr) m dm \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $b_{22} = c_{22} b'_{22}$ ,  $a_{22} = c_{22} a'_{22}$ 。

当 $AB/2 \rightarrow \infty$ 时, 可认为 $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $h_2 \rightarrow 0$  即有:

$$\begin{aligned} a'_{22} &= \frac{-K_{12} e^{2mZ_1} (1 - K_{23} e^{-2mZ_2})}{1 + K_{12} K_{23} e^{-2mh_2}} \approx \frac{-K_{12} (1 + K_{23})}{1 + K_{12} K_{23}} \\ b'_{22} &= \frac{K_{23} e^{-2mZ_2} (1 + K_{12} e^{2mZ_1})}{1 - K_{12} K_{23} e^{-2mh_2}} \approx \frac{K_{23} (1 - K_{12})}{1 + K_{12} K_{23}} \end{aligned}$$

代入(5)式则

$$\begin{aligned} \rho_s(\theta = 0^\circ) &= r^2 \rho_2 \left[ 1 - \frac{K_{12} (1 + K_{23})}{1 + K_{12} K_{23}} + \frac{K_{23} (1 - K_{12})}{1 + K_{12} K_{23}} \right] J_1(mr) m dm \\ &= \rho_2 \left[ \frac{1 + K_{12} K_{23} - K_{12} - K_{12} K_{23} + K_{23} - K_{12} K_{23}}{1 + K_{12} K_{23}} \right] = \frac{2\rho_1 \rho_3}{\rho_1 + \rho_3} \end{aligned} \quad (6)$$

因图中 $\rho_1 = \rho_3 = 10 \Omega \cdot m$ , 所以 $\rho_s(\theta = 0^\circ)$ 的尾支趋于10的渐近线, 推广到 $n$ 层直立岩层断面, 只要 $AB/2 \rightarrow \infty$ , 则尾支渐近线 $\rho_{s\infty} = \frac{2\rho_1 \rho_n}{\rho_1 + \rho_n}$ 。

(2) 垂直分界面布极

垂直分界面布极时的 $\rho_s$ 尾支渐近值, 我们很容易从物理分析中得到。根据 $\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \rho_{MN}$ 公式, 当 $AB/2$ 远大于测深点至分界面的距离 $H_1$ 、 $H_2$ 和 $h_2$ 时,  $j_{MN}$ 接近于均匀场电流密度 $j_0$ , 故 $\rho_{s\infty} \approx \rho_{MN} = \rho_2$ 。

上述计算结果, 理论分析证明是完全正确的。

(3) 与分界面斜交布极

这时 $\rho_s$ 曲线的尾支与交角 $\theta$ 及电性参数有关, 其渐近线值有时介于平行和垂直布线之间, 有时与它们一样趋于同一数值(如图4)。文献〔3〕在讨论单界面 $\rho_s$ 曲线的特点时, 认为布极方向与界面斜交时,  $\rho_s$ 曲线介于垂直和平行分界面布极的 $\rho_s$ 曲线之间。这一结论性的意见并不能推广到多个直立层分界面。可见在直立层上同一测点而不同方向布极,  $\rho_s$ 曲线是不同的。从理论上讲它有无限多条。并且, 由于布极方向不同, 同一断面所得的 $\rho_s$ 测深曲线的形态和异常值也是差别很大的, 甚至在某一极距范围内, 如图4测点在多个直立层中部 $\rho_3$ 中心时,  $\rho_s(\theta = 0^\circ)$ 的曲线呈高阻反映; 而 $\rho_s(\theta = 45^\circ)$ 和 $\rho_s(\theta = 90^\circ)$ 的曲线却呈低阻反映, 显然, 应用水平层理论进行解释将出现严重的错误。

2.3 从 $\rho_s$ 异常幅值看, 平行分界面布极的 $\rho_s$ 曲线的畸变比其它方向布极大得多, 特别是对于低阻直立脉。所以, 平行岩层走向布极的 $\rho_s$ 测深有利于发现低阻体。

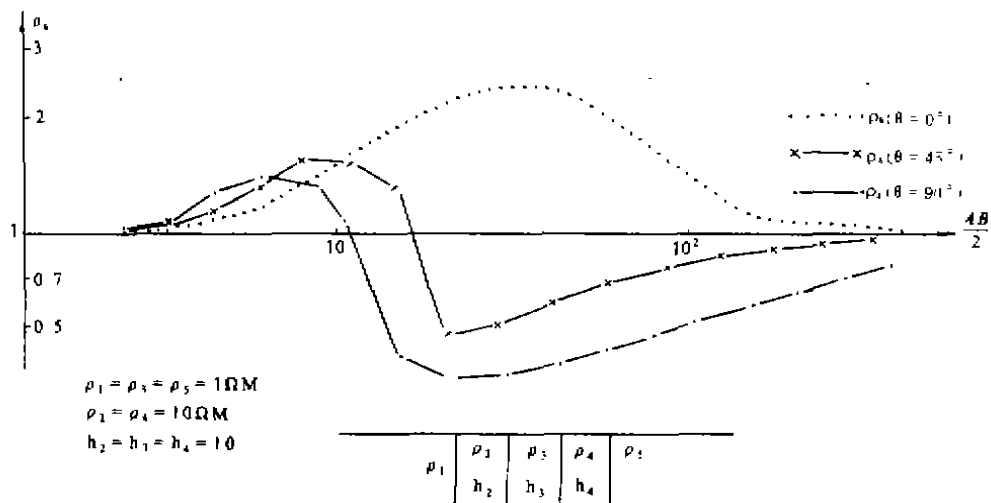


图 1

2.4 图 5 为两个直立岩脉断面。不同测点上以相同方向布极（平行岩脉走向）所测得的各项  $\rho_s$  曲线，其形态差别很大（图 5 (a)）。但有规律可循，曲线首支由观测点所在介质的电阻率确定；曲线尾支都趋于同一渐近值：

$$\frac{2\rho_1\rho_5}{\rho_1+\rho_5}$$

图 5 (b) 为  $\rho_s$  等值断面图。图中两个高阻半封闭圈，清楚反映两个高阻体的存在

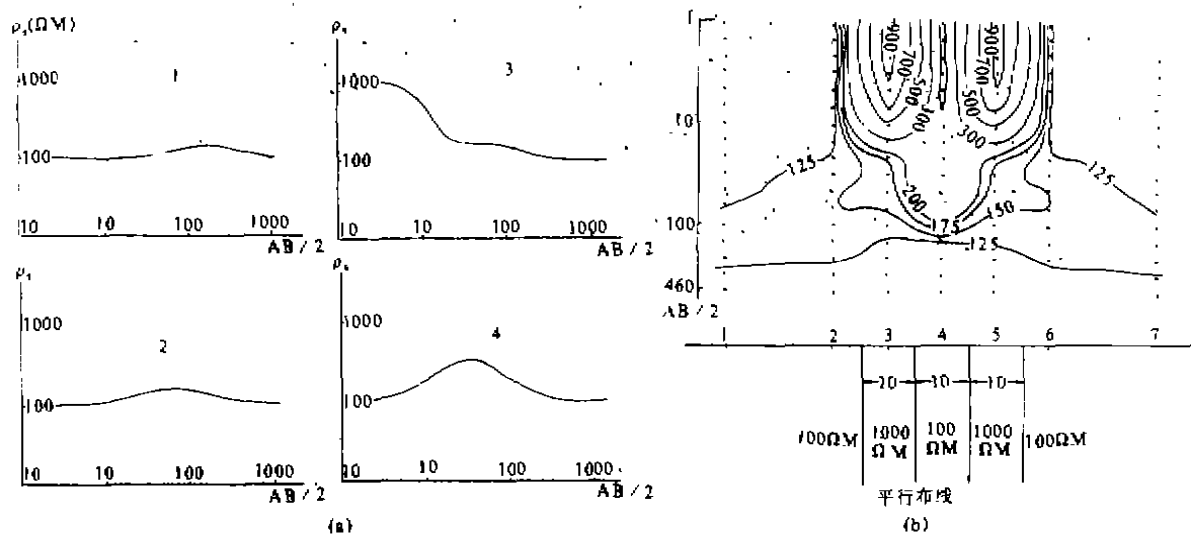


图 5

2.5  $\rho_s$  等值断面图的形态，除与地电模型参数有关外，同一地电模型不同测深点改变布极方向时，其  $\rho_s$  等值断面图不同，且具有无限多种类型。图 6 为一直立层断面及其  $\rho_s$  等值断面图。图 6 c 为平行岩层走向布极；图 6 b 为第 1—6 号点垂直岩层走向布极，其余点平行岩层走向布极；图 6 a 为第 4—6 号点与走向成 45° 斜交布极，其余点平行走向布极。从图可见垂直或斜交岩层走向布极与平行岩层走向布极的图比较，面目全非。以图 6 c 的概念去解释图 6 a 与 6 b，将造成严重的错误。

### 3 隐伏直立岩层上的 $\rho_s$ 测深曲线

图7a和b均为隐伏直立岩层断面，但前者直立岩层相对覆盖层是高阻，而后者是低阻。从图中 $\rho_s$ 曲线可看出，电性参数取值不同，因而曲线形态不同；尽管不同布极方向，曲线形态各异，但曲线同样有其特征规律

① 曲线首支渐近值为覆盖层电阻率值。曲线尾支在不同电性参数和不同布极方向的条件下各不相同。就所论地电断面而言，平行岩层走向布极时，其尾支渐近值  $\rho_s \rightarrow \frac{2\rho_2\rho_4}{\rho_2+\rho_4}$ ；垂直岩层走向布极，则  $\rho_s \rightarrow \rho_3$ 。这一结论不难从物理分析中证明，这就是说当  $AB/2 \rightarrow \infty$  时，近似把覆盖层看作不存在，因而曲线尾支与无覆盖层的情况具有同一种性态。

② 图8为隐伏低阻脉、低阻覆盖条件下，不同布极方向上的 $\rho_s$ 等值线断面图，表明同一断面不同布极方向的 $\rho_s$ 等值线断面图的形态不同。垂直岩脉走向布极与平行岩脉走向布极差异较大，前者具有漏斗形、低阻脉两边等值线分开，后者则为花盆状、底部封闭上尖下大。但它们同时以各自的特点（中间下凹）反映低阻脉的存在。图8c为岩脉走向成45°布极的情况，它介于前述两种形态之间。

由此可见，对于隐伏岩脉的 $\rho_s$ 测深曲线，一般比无覆盖层时要复杂，同一测点上不同布极方向的 $\rho_s$ 曲线不同，同一断面不同布极方向的 $\rho_s$ 等值线断面图也不同。若每个测点上采用任意布极，则势必造成形态复杂，给解释带来困难，故实际工作时要力图避免，尽可能采用同一方向布极。

### 4 结论

通过上述直立层（直立脉）上对称四极 $\rho_s$ 测深曲线和 $\rho_s$ 等值断面图的分析研究，可以得出如下几点结论：

4.1 对于直立层（可以推广到非水平层）而言，一个观测点上的电测深曲线，除能判断覆盖层厚度（在有覆盖层条件下）之外，难于应用该曲线解决有关陡倾斜岩层参数问题。这是因为同一地电模型在同一测点上而布极方向不同时， $\rho_s$ 曲线的响应不同，而且在不同测点上曲线形态不同。故在金属矿区和水文工程勘探中，以一个测点上的任一方向的一条 $\rho_s$ 曲线，应用水平层电测深的解释方法是不行的。

4.2 对于隐伏陡立岩脉而言， $\rho_s$ 等值断面图提供地质信息最为丰富，一方面它可以区分不同地电断面类型，同时又能解决地质对象的形态及相对电性关系，对覆盖层下均匀介质中的倾斜岩脉，还能解决产状问题（如图9）。在 $\rho_s$ 拟断面图上，等值线拉长方向，反映了低阻岩脉的倾斜方向。

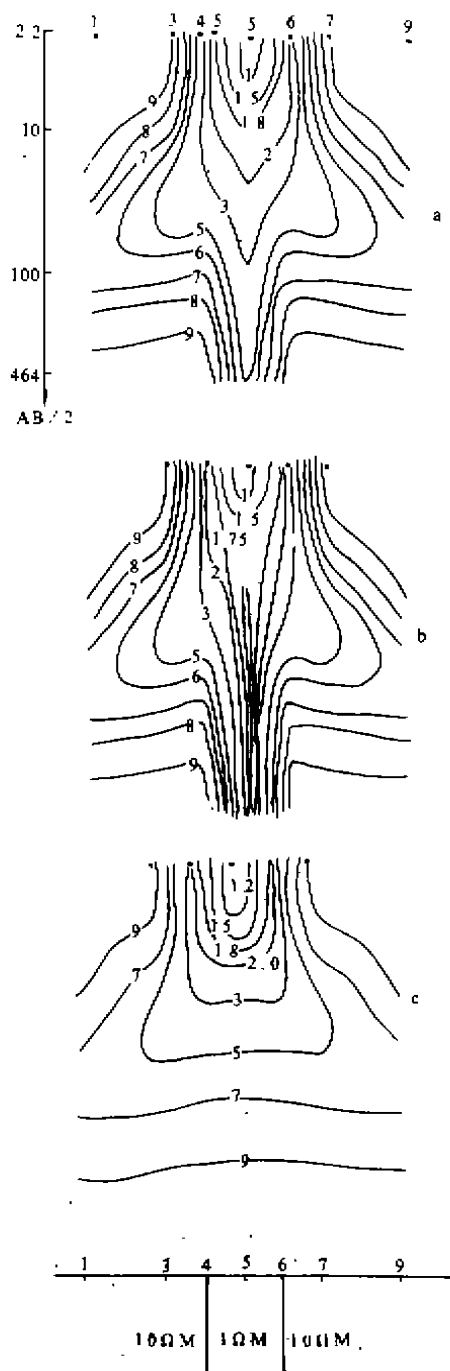


图 6

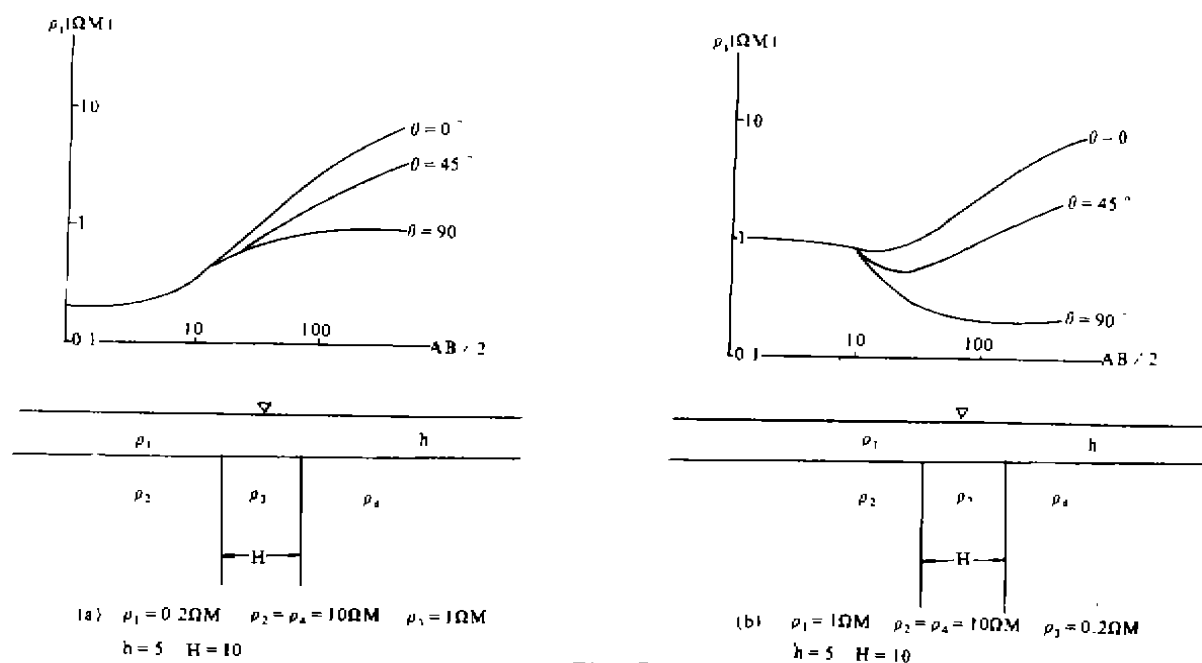


图 7

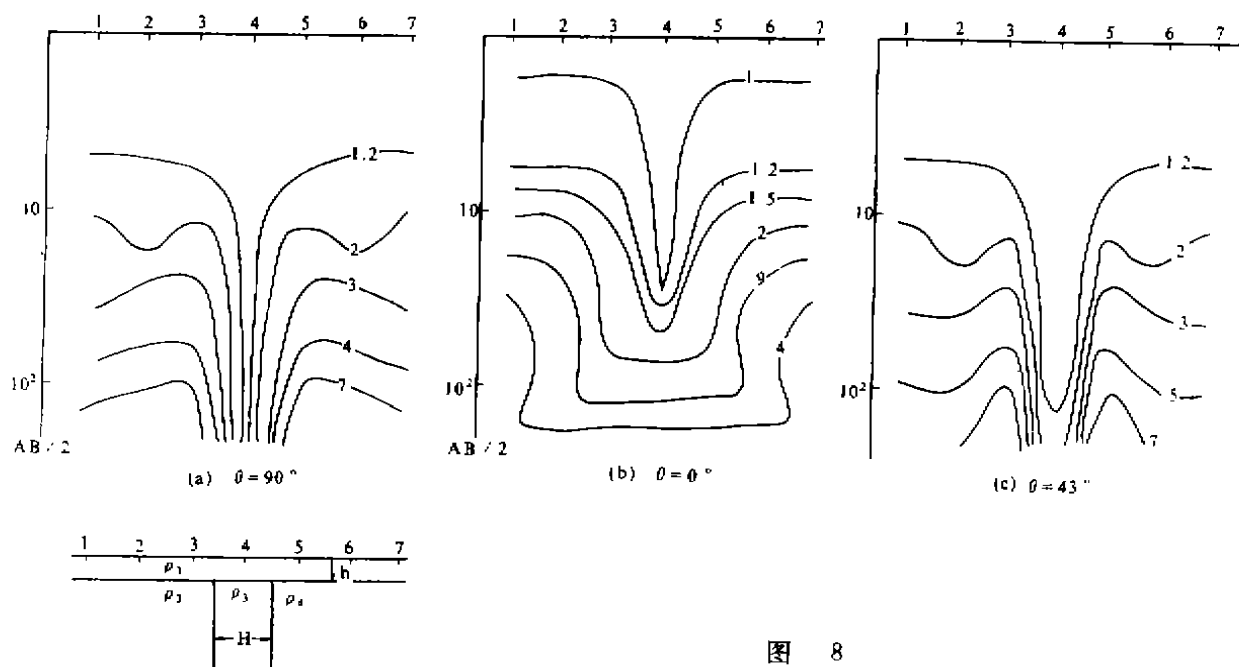


图 8

4.3 在野外条件下要解决非水平层 $\rho_s$ 测深曲线的反演问题，必需了解地电断面的正演曲线形态，确定布极方向。这样才可能利用反演手段，解决有关反演问题。

### 参 考 文 献

- 1 李纯志、刘象勤，多层不同电阻率垂直岩层的点电源场，桂林冶金地质学院学报，1987（3）
- 2 李纯志、刘象勤，复杂地电断面正演计算——代替层等效电阻率法，勘探地球物理北京（89）国际讨论会论文摘要，1989（6）
- 3 傅良魁主编，电法勘探教程，北京：地质出版社，1983