

直立接触面视电阻率量板

陈福萍 于安良

有关两种介质直立接触面的电位理论、公式和曲线，在电法勘探课程中都介绍过，但很少涉及测线方向斜交于直立接触面的情况，更没有给出相应的视电阻率公式和曲线。本文导出适用于斜交情况的电剖面 and 电测深公式，为简化计算并编制了直立接触面视电阻率量板和图册，能用来解决陡倾接触面旁侧电阻率法推断解释中的一些实际问题。

一 直立接触面电位计算量板

两种介质直立接触，其地表上的水平电位分布问题，可以用静电镜像法求解。

图1中布极方位在x轴，它与电阻率为 ρ_i 和 ρ_j 两种介质的接触面相交，交角为 θ 。电源点C、测量点P到交点O的距离为 x_c 、 x_p 。

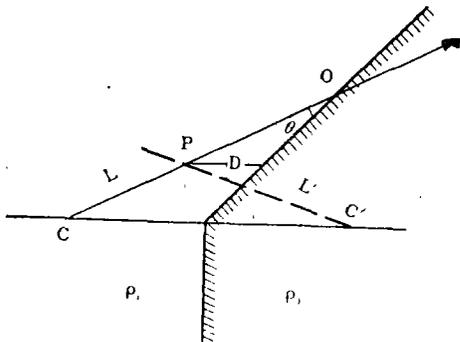


图1 直立接触面

由镜像法可以写出下列电位公式：当C和P在不同介质情况下，虚电源与 c' 重合。

$$V = \frac{\rho_i I}{2\pi CP} + \frac{\rho_i I}{2\pi C'P}$$

$$= \frac{\rho_i I}{2\pi} \left(\frac{1}{L} + \frac{k_{ij}}{L'} \right) \quad (1)$$

当C在 ρ_i 介质，P在 ρ_j 介质，虚电源也在 C' 上。

$$V = \frac{\rho_i I}{2\pi} \left(\frac{1}{L} + \frac{k_{ij}}{L'} \right) \quad (2)$$

(1)(2)两式中 $k_{ij} = \frac{\rho_i - \rho_j}{\rho_j + \rho_i}$ (反射系数)

$$L = CP = |x_c - x_p|$$

$$L' = C'P = \sqrt{L^2 + (2x_c \cdot \sin\theta)^2} - 2L \cdot (2x_c \cdot \sin\theta) \cdot \cos(90^\circ - \theta)$$

$$\therefore L' = \sqrt{L^2 + 4\sin^2\theta \cdot x_p \cdot x_c} \quad (3)$$

我们引入符号J，令

$$J = \begin{cases} \frac{L}{L'}, & \text{当C、P在同一介质时} \\ 1, & \text{当C、P在不同介质时} \end{cases} \quad (4)$$

这样就可以将(1)、(2)两式合写为下列电位通式

$$V = \frac{\rho_i I}{2\pi} \left(\frac{1}{L} + k_{ij} \frac{J}{L} \right) \quad (5)$$

又设 $T = \begin{cases} \frac{x_p}{L}, & \text{当 } x_p < x_c \\ \frac{x_p}{L} - 1, & \text{当 } x_p > x_c \end{cases} \quad (6)$

则 $J = \begin{cases} [1 + 4\sin^2\theta \cdot T \cdot (T+1)]^{-\frac{1}{2}} & (T > 0) \\ 1 & (T < 0) \end{cases} \quad (8)$

选定一系列 θ 角后，以T为自变量用(8)式计算出J值(表1)，并制作成J-T列线图(图2)，称为“直立接触面电位计算量板”，简称“J量板”。用J量板能计算各种电极排列(联合剖面、电测深、偶极-偶极等)在布极方向与接触面成任意交角时的视电阻率值。

直立接触面电位计算量板数据表

表 1

$\frac{J}{T}$ \ θ	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	60°	75°	90°
0.02	0.99960	0.99870	0.99720	0.99520	0.99270	0.98990	0.98600	0.98350	0.98020	0.97680	0.97070	0.96390	0.9615
0.05	0.99920	0.99680	0.99300	0.98790	0.98170	0.97470	0.96710	0.95920	0.95130	0.94350	0.92940	0.91440	0.9090
0.1	0.99830	0.99340	0.98550	0.97520	0.96280	0.94910	0.93460	0.91980	0.90530	0.89150	0.86710	0.84190	0.8333
0.15	0.99730	0.98970	0.97760	0.96190	0.94350	0.92350	0.90270	0.88210	0.86220	0.84360	0.81170	0.77990	0.7692
0.2	0.99630	0.98580	0.96930	0.94810	0.92390	0.89800	0.87170	0.84610	0.82190	0.79970	0.76240	0.72630	0.7142
0.25	0.99520	0.98160	0.96050	0.93400	0.90410	0.87280	0.84170	0.81200	0.78440	0.75950	0.71840	0.67940	0.6666
0.3	0.99410	0.97720	0.95150	0.91960	0.88430	0.84810	0.81290	0.77970	0.74950	0.72250	0.67880	0.63810	0.6249
0.4	0.99150	0.96780	0.93240	0.89010	0.84510	0.80060	0.75870	0.72060	0.68680	0.65730	0.61080	0.56880	0.5555
0.5	0.98870	0.95760	0.91250	0.86030	0.80690	0.75590	0.70940	0.66820	0.63240	0.60180	0.55470	0.51300	0.5000
0.6	0.98570	0.94660	0.89180	0.83060	0.77010	0.71420	0.66470	0.62170	0.58520	0.55440	0.50760	0.46710	0.4545
0.7	0.98230	0.93510	0.87070	0.80140	0.73510	0.67570	0.62420	0.58050	0.54390	0.51340	0.46770	0.42870	0.4167
0.8	0.97880	0.92300	0.84940	0.77290	0.70200	0.64010	0.58770	0.54390	0.50760	0.47780	0.43350	0.39600	0.3846
1.0	0.97090	0.89750	0.80680	0.71870	0.64160	0.57730	0.52470	0.48190	0.44720	0.41900	0.37790	0.34370	0.3333
1.2	0.96210	0.87090	0.76530	0.66880	0.58860	0.52410	0.47270	0.43180	0.39900	0.37270	0.33480	0.30350	0.2941
1.6	0.94220	0.81600	0.68760	0.58250	0.50170	0.44020	0.39300	0.35630	0.32750	0.30470	0.27230	0.24590	0.2381
2.0	0.91960	0.76160	0.61920	0.51240	0.43490	0.37790	0.33520	0.30260	0.27730	0.25740	0.22940	0.20670	0.2000

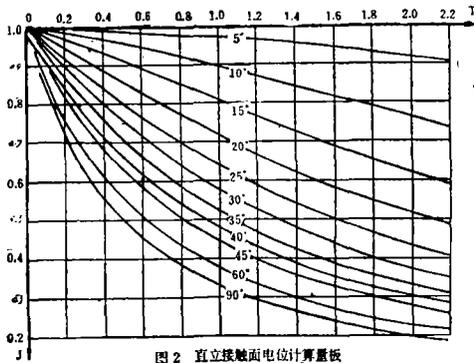


图 2 直立接触面电位计算量板

$$- \frac{J(T_{BM})}{BM} \} \quad (11)$$

计算时根据已知的 A、M、N、B 位坐标 (x_A、x_M、x_N、x_B) 用 (6)、(7) 式推算 T_{AM}、T_{AN}、T_{BM}、T_{BN}，再在 J 量板图中某 θ 角的 J—T 曲线上查出它们对应的 J 值，即为 J(T_{AM})、J(T_{AN})、J(T_{BN})、J(T_{BM})，连同装置系数 k、反射系数 k_{ij}，代入 (10)、

(11) 式，即可算出 ρ_S^A 值和 ρ_S^B 值。

在计算联合剖面曲线时，考虑到电极互换原理和对称关系，就可省略许多计算工作量。

图 3 是用 J 量板计算的与直立接触面正交 (θ = 90°) 和斜交 (θ = 30°) 的联合剖面曲线。两种介质的电阻率的比值 ρ₁ : ρ₂ = 1 : 1/5。正交曲线是人们熟悉的曲线，而在 θ = 30° 的斜交曲线上，接触面附近的极大值和极小值特征点消失了，在离接触面 AO 距离以外曲线歧离带的幅度稍许变宽。

由 $\rho_s = k \cdot \frac{\Delta V}{I}$, ($k = 2\pi \frac{AM \cdot MN}{MN}$)

可推出应用 J 量板计算两个三极装置的视电阻率公式

$$\rho_S^A = \rho_i \left\{ 1 + \frac{k}{2\pi} \cdot k_{ij} \left(\frac{J(T_{AM})}{AM} - \frac{J(T_{AN})}{AN} \right) \right\} \quad (10)$$

$$\rho_S^B = \rho_i \left\{ 1 + \frac{k}{2\pi} \cdot k_{ij} \left(\frac{J(T_{BN})}{BN} - \frac{J(T_{BM})}{BM} \right) \right\}$$

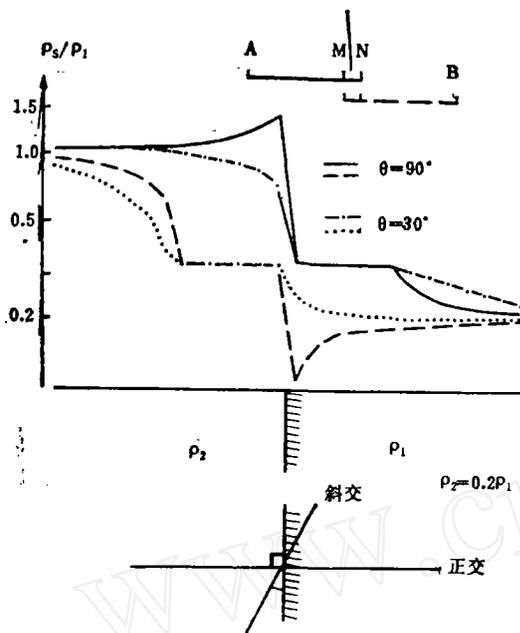


图3 测线正交和斜交直接触面的联合剖面曲线

二 电测深直接触面量板

电测深图册一般都是用 $MN \rightarrow 0$ 的公式推导的, 这时 $\rho_s = 2\pi L^2 \frac{E}{I}$ 。E 是场强, 它是矢量。当斜交测线的 C 和 P 都在 ρ_1 时 (图 1), 虚源 C' 所产生的场强在 \vec{CP} 方向上的分量为 $E_{c'} \cdot \cos(\vec{C}'P, \vec{CP})$, 即表示为 $[E_{c'}]_x = E_{c'} \cdot \cos(\vec{L}', \vec{L})$ 。x 方向上实、虚源产生的总场强

$$E = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\frac{1}{L^2} + k_{ij} \cdot \frac{\cos(\vec{L}', \vec{L})}{L'^2} \right]$$

$$\therefore \rho_s = \rho_1 \left[1 + k_{ij} \cdot \frac{L^2}{L'^2} \cdot \cos(\vec{L}', \vec{L}) \right]$$

$$(\vec{L}', \vec{L})$$

引入符号 J_s , 令

$$J_s = \begin{cases} \frac{L^2}{L'^2} \cdot \cos(\vec{L}', \vec{L}), & \text{当 C, P 在同一介质时} \\ 1, & \text{当 C, P 在不同介质时} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{则 } \rho_s = \rho_1 [1 + k_{ij} \cdot J_s] \quad (13)$$

$\cos(\vec{L}', \vec{L})$ 为 $E_{c'}$ 的方向余弦, 即 L' 与 L 间夹角的余弦。

$$\cos(L', L) = \frac{L^2 + L'^2 - (CC')^2}{2L \cdot L'}$$

又由 (3) 式

$$J_s = \begin{cases} 1 + 2 \sin^2 \theta \cdot \frac{x_c}{L} \cdot \frac{(x_p - x_c)}{L} \\ [1 + 4 \sin^2 \theta \cdot \frac{x_c}{L} \cdot \frac{x_p}{L}]^{3/2}, & \text{C, P 在同一介质时} \\ 1, & \text{C, P 在不同介质时} \end{cases} \quad (14)$$

而在 C, P 同坡情况还要考虑

$$\text{当 } x_c > x_p: x_c/L = (x_p/L) + 1$$

$$\text{当 } x_c < x_p: x_c/L = (x_p/L) - 1$$

电测深的测量中心点位置固定, 该点到接触面的距离为 D (见图 1)。

$D = x_p \cdot \sin \theta$, 因此

$$J_1 = \frac{1 - 2\left(\frac{D}{L}\right) \sin \theta - 2 \sin^2 \theta}{\left[1 + 4\left(\frac{D}{L}\right)^2 + 4\left(\frac{D}{L}\right) \sin \theta\right]^{3/2}} \quad \text{C, P 同介质, } x_c > x_p \quad (15)$$

$$J_2 = \frac{1 + 2\left(\frac{D}{L}\right) \sin \theta - 2 \sin^2 \theta}{\left[1 + 4\left(\frac{D}{L}\right)^2 + 4\left(\frac{D}{L}\right) \sin \theta\right]^{3/2}} \quad \text{C, P 同介质, } x_c < x_p \quad (16)$$

$$1, \quad \text{C, P 在不同介质} \quad (17)$$

欲计算三极测深曲线, 将 J_s 代入 (13) 式。

计算对称测深用下式:

$$\rho_s = \rho_1 [1 + k_{ij} \cdot \Phi] \quad (18)$$

$$\text{式中 } \Phi = \begin{cases} 1/2(J_1 + J_2), & \text{当 } L < x_p \\ 1/2(J_1 + 1), & \text{当 } L > x_p \end{cases} \quad (19)$$

$$\Phi = \begin{cases} 1/2(J_1 + 1), & \text{当 } L > x_p \end{cases} \quad (20)$$

极距 $L = AB/2$, 则 $L/D = AB/2D$ 。Φ 取决于 θ 和 $AB/2D$ 。当 θ 确定后, Φ 是 $AB/2D$ 的函数。应用 (15)、(16)、(17) 和 (19)、(20) 等式, 计算一系列 θ 角的 Φ ~ $AB/2D$ 关系曲线, 数据见表 2。曲线画在双对数坐标上, 横轴为 $AB/2D$, 纵轴为 Φ。制成“对称电测深直接触面作图量板”, 也称为 Φ 量板 (图 4)。

对称电测深直立接触面作图量板数据

表 2

Φ AB/2D	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.3	0.003264	0.003504	0.004171	0.005106	0.006069	0.006794	0.007064
0.5	0.01426	0.01546	0.01887	0.02390	0.02943	0.03385	0.03555
0.9	0.06910	0.07648	0.09934	0.1393	0.1962	0.2573	0.2865
1.1	0.1119	0.1247	0.1660	0.2457	0.3809	0.4400	0.4370
1.3	0.1618	0.1809	0.2442	0.3767	0.4381	0.4263	0.4224
1.5	0.2160	0.2410	0.3260	0.4531	0.4278	0.4130	0.4081
1.8	0.2993	0.3312	0.4386	0.4470	0.4138	0.3942	0.3878
2.2	0.4051	0.4393	0.5050	0.4414	0.3973	0.3714	0.3628
3.0	0.5760	0.5953	0.5271	0.4360	0.3714	0.3328	0.3200
4.0	0.7155	0.6987	0.5539	0.4354	0.3484	0.2955	0.2777
6.0	0.8538	0.7680	0.5960	0.4408	0.3202	0.2445	0.2187
10	0.9428	0.8329	0.6448	0.4535	0.2938	0.1891	0.1527
20	0.9851	0.8839	0.6923	0.4713	0.2721	0.1353	0.08677
50	0.9976	0.9139	0.7257	0.4870	0.2587	0.09635	0.03772
100	0.9994	0.9235	0.7376	0.4932	0.2543	0.08203	0.01941

应用 Φ 量板可以制作各种交角、各种电阻率比值的直立接触面的对称电测深曲线。 Φ 量板的读数方法如下：取透明双对数纸二张，它们的纵轴左侧标出 $|k_{ij}|$ 刻度，即利用对数坐标线从上到下标出 $|k_{ij}| = 1, 0.9, \dots, 0.1$ 等，横轴是AB/2D坐标（与 Φ 量板横轴刻度相同）。用一张来计算 $\rho_j > \rho_i$ 情况，则要在纵轴右侧与 $|k_{ij}|$ 相应刻度上标出 $1 +$

$|k_{ij}|$ 值。读数时，根据实际的 ρ_j/ρ_i 比值计算 k_{ij} ，将 $|k_{ij}|$ 轴上该数值刻度与 Φ 量板之 $\Phi = 1$ 横轴重合。再读出某 θ 曲线上对应于右刻度的数值，即为 (ρ_s/ρ_o) 值；另一张纸计算 $\rho_j < \rho_i$ 情况， $|k_{ij}|$ 纵轴右刻度为 $1 - |k_{ij}|$ 值，读数方法相同。

用 Φ 量板或从(15)~(20)等式可以计算出系统的《对称电测深直立接触面量

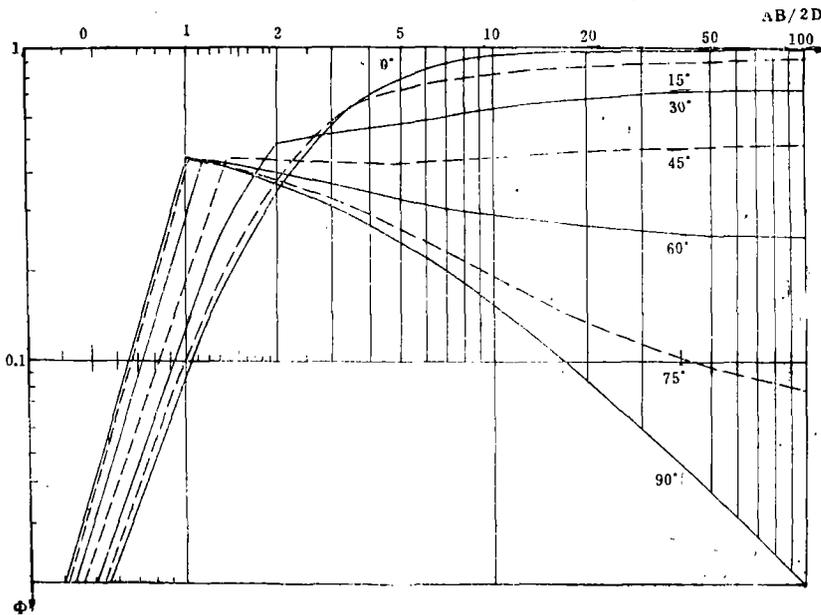


图 4 对称电测深直立接触面作图量板

板》曲线图册。其 θ 角度化是 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，电阻率比值 $0 \sim \infty$ 。图5和图6列举其中的 $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 五个斜交角的曲线组（ $\theta = 0^\circ$ 和 90° 的曲线组，在有关的书籍中已画出）。用这些曲线，就可以计算直立接触面对电测深的影响。

三 实际应用

云南某多金属矿区利用对称电测深确定灰岩下部花岗岩起伏形态，从而间接寻找夕卡岩型多金属硫化矿床。然而，当测深曲线受高阻灰岩与旁侧低阻砂页岩接触面影响时，曲线发生畸变。如果不消除接触面干扰异常，就会导致推断上的错误。

图7为该区D—724点的实测电测深曲线，曲线呈KQ型，（ $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$ ）， ρ_4 趋于 $1000 \Omega M$ ，这与已知花岗岩电参数接近，推断在460米以下为花岗岩。实际钻孔打到1006米仍未见花岗岩。推断错误来源于接触面的影响。应用本文介绍的对称电测深直立接触面量板曲线，就能大致改正这种影响。D—724点处浮土（ ρ_1 层）很薄，可以忽略。 ρ_2 层相当厚，是白云岩（ T_2k ），电阻率为 $2 \sim 2.5 \times 10^4 \Omega M$ 。从平面图（图7左上角）可见测深点西侧500米以外是大片浮土（Q）和砂页岩（ T_2f ），它们的电阻率为 $8 \sim 10 \times 10^2 \Omega M$ 。布极方位与接触界面大致成 10° 的交角。选用图5中的 $\theta = 10^\circ$ 、电阻率比值 $= 1/30$ 的曲线，并将它的 $AB/2D = 1$ 纵线对准实测曲线横轴 $AB/2 = 500$ 米位置，见图7右上角曲线。用此曲线对实测曲线作相除改正以后，曲线变为K型（ $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ ）， ρ_3 趋于 $4500 \Omega M$ ，仍在碳酸盐类岩石电参数范围之内。原来所谓的 ρ_4 层已不存在，

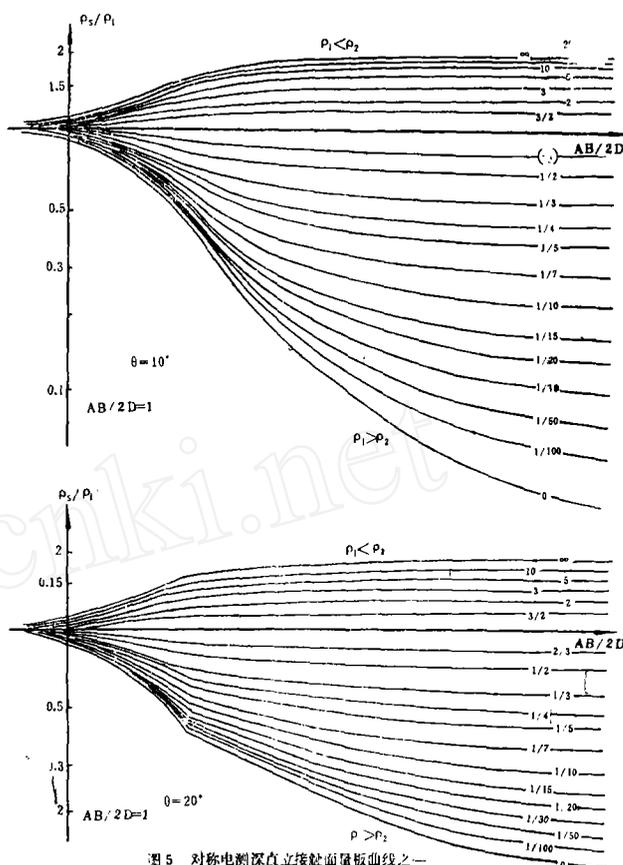


图5 对称电测深直立接触面量板曲线之一

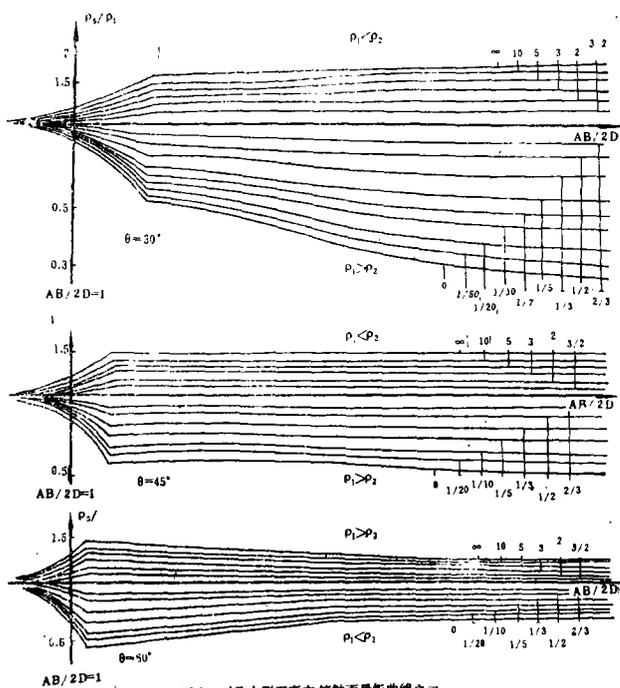


图6 对称电测深直立接触面量板曲线之二

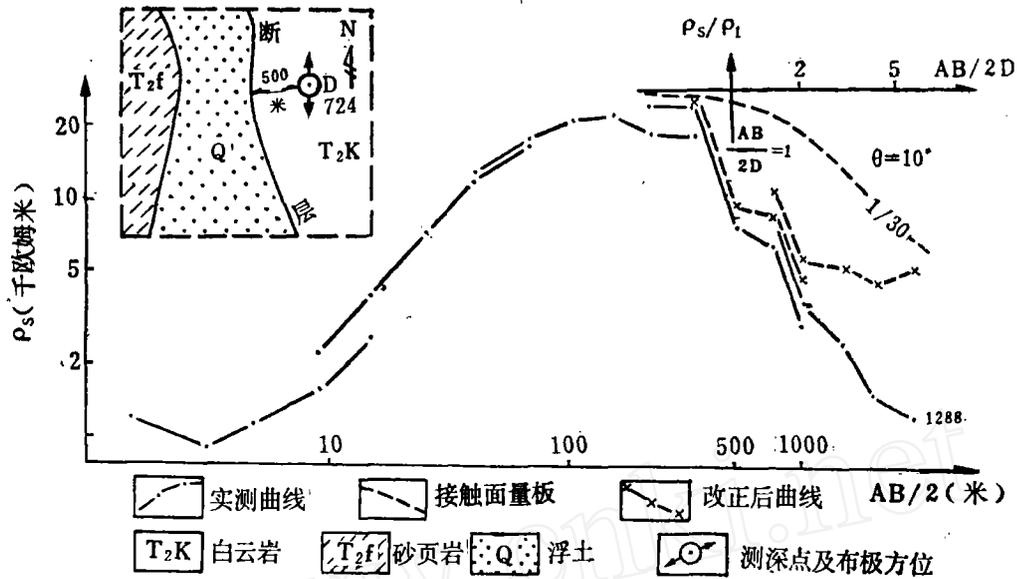


图7 对称电测深接触面影响的改正实例

说明 1000 米以前不可能有花岗岩。原推断将接触面的影响误认为花岗岩的突起。

该区曾作过大量电测深工作，现在对其

中受接触面影响的电测深曲线都用接触面量板进行了校正。然后再推断花岗岩起伏形态，所得结果颇接近于深部实际情况。

小测验

你能从这组图示中目测出黑色矿物的含量(%)吗？(答案请在本期中找)

①

②

③

④

⑤

⑥

⑦

⑧