



# 利用中梯装置实测曲线确定

## 岩(矿)脉深度的实验公式

武汉地质学院 罗延钟

野外最常见的脉状地质体几何参数(长、宽、延深、倾角、走向等)多,其 $\rho_s$ 或 $\eta_s$ 的理论公式复杂,至今还没有导出求深度的理论公式。根据模型实验资料,我们总结出利用中梯装置测得的 $\rho_s$ 曲线来确定高阻岩(矿)脉上顶深度 $h$ 的实验公式,对公式的应用作了讨论,并将它推广应用于中梯装置 $\eta_s$ 曲线的解释。

### 实验技术

模型实验是在水槽中进行的,以水作为均匀的围岩介质,以矩形玻璃板模拟高阻薄岩(矿)脉,上漆涂油的矩形木箱模拟高阻厚岩(矿)脉。模型的大小从 $60 \times 40$ (长 $\times$ 宽)到 $150 \times 60$ 厘米<sup>2</sup>。供电电极距一般采用 $AB = 300$ 厘米;通过实测证明,在上述情况下水槽边缘的影响可忽略不计。工作时由低频交流电源供电,采用中梯电极排列,以真空管毫伏计进行测量。

### 实验成果

对于不同埋藏深度的高阻直立薄脉来说,随着深度的增大,中梯装置 $\rho_s$ 曲线的异常值 $M = (\rho_s^{\max} - \rho_1) / \rho_1$ 急剧减小(其中, $\rho_s^{\max}$ 是 $\rho_s$ 曲线上的极大值, $\rho_1$ 是围岩的电阻率),而异常范围逐渐变宽,同时曲线的斜率逐渐变小(图1)。利用充电法或自然电场法中所采用的解释方法,可以求出中梯装置 $\rho_s$ 曲线上过拐点切线的弦切距 $m$ 和半极值点间的弦长 $q$ (图2)。根据上述曲线的变化规律可以设想,参数 $m$ 和 $q$ 与岩(矿)脉上顶深度 $h$ 将有正变关系。事实上,对所得实验资料进行分析统计的结果,发现这些参数之间有如下近似的线性关系(图3):

$$h = (0.56 \sim 0.6) m \approx 0.6m \quad (1)$$

$$h = (0.45 \sim 0.5) q \approx 0.5q \quad (2)$$

曾在同一埋藏深度但大小和产状( $L$ 、

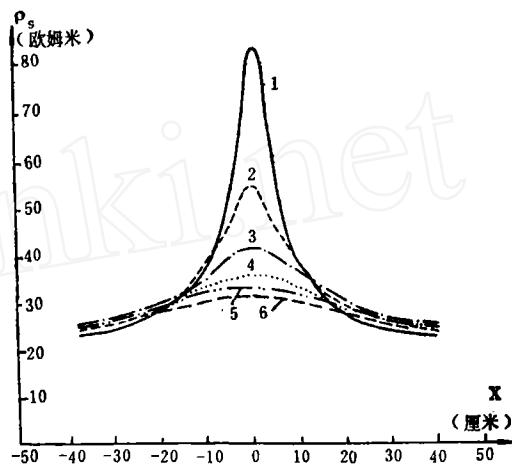


图1 在不同埋深的高阻薄脉上,中梯装置的 $\rho_s$ 实验曲线

模型大小:  $L \times d = 150 \times 60$ 厘米<sup>2</sup>

装置大小:  $AB = 300$ 厘米,  $MN = 2$ 厘米

1— $h = 5$ 厘米, 2— $h = 10$ 厘米, 3— $h = 15$ 厘米,

4— $h = 20$ 厘米, 5— $h = 25$ 厘米, 6— $h = 30$ 厘米

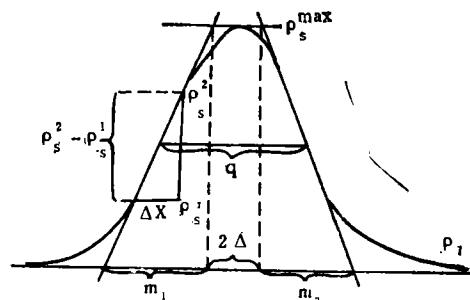


图2 中梯装置 $\rho_s$ 曲线的弦切距 $m$ 和半极值点弦长 $q$

$d$ 、 $H$ 和 $\alpha$ )不同的各种高阻岩(矿)脉模型上,以不同极距 $AB$ 和不同观测剖面位置(改变观测剖面与模型中心之距离 $y$ 和改变观测剖面与模型走向之间的夹角 $\varphi$ )进行了测量,所得 $L$ 、 $d$ 、 $H$ 、 $\alpha$ 、 $AB$ 、 $y$ 和 $\varphi$ 等因素与参数 $m$ 和 $q$ 的关系曲线示于图4至图10。从这些曲线可以看出:

1.在直立高阻岩(矿)脉上,中梯装置

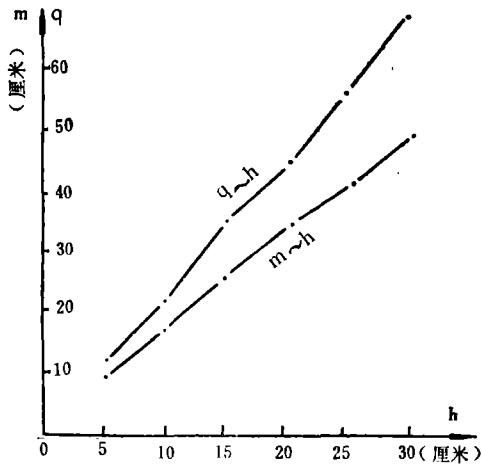


图3 参数m和q与h的关系曲线  
 $L \times d = 150 \times 60$ 厘米<sup>2</sup>  
 $AB = 300$ 厘米,  $MN = 2$ 厘米

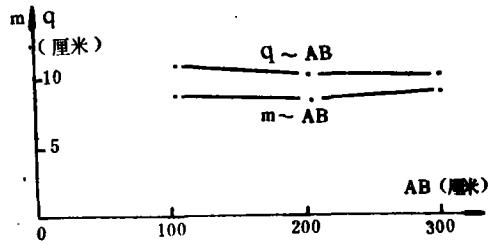


图6 参数m和q与供电电极距AB的关系曲线  
 $h = 5$ 厘米,  $L = 60$ 厘米,  $d = 40$ 厘米

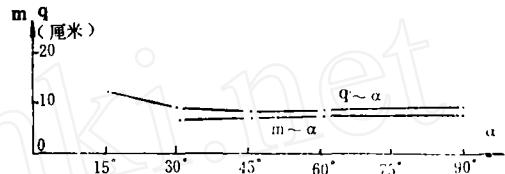


图7 参数m和q与岩脉倾角alpha的关系曲线  
 $h = 5$ 厘米,  $L = 60$ 厘米,  $d = 40$ 厘米

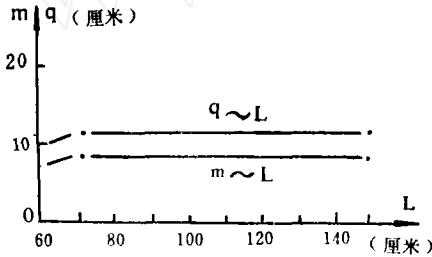


图4 参数m和q与岩(矿)脉走向长度L的关系曲线  
 $h = 5$ 厘米,  $d = 40$ 厘米

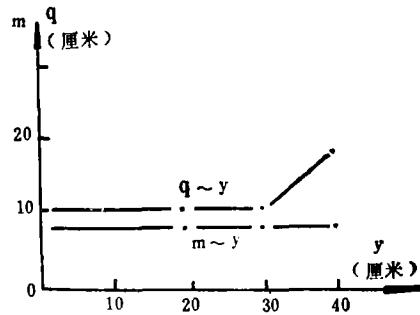


图8 参数m和q与剖面到岩脉中心的距离y的关系曲线  
 $h = 5$ 厘米,  $L = 60$ 厘米,  $d = 40$ 厘米

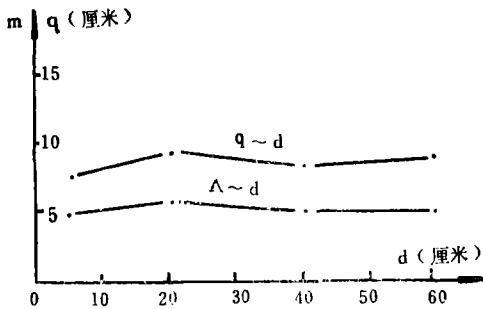


图5 参数m和q与岩脉延深长度d的关系曲线  
 $h = 5$ 厘米,  $L = 60$ 厘米

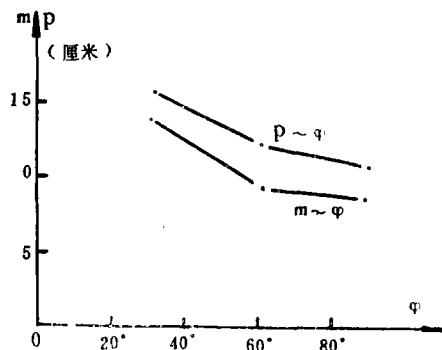


图9 参数m和q与剖面与岩脉走向之夹角phi的关系曲线  
 $h = 5$ 厘米,  $L = 60$ 厘米,  $d = 40$ 厘米

$\rho_s$  曲线的参数 m 和 q, 在实验所用参数范围内与岩(矿)脉走向长度 L, 延深长度 d 和供电电极距 AB 的大小无关(图 4、5、6)。

2. 在倾斜产状的岩(矿)脉上, 参数 m 和 q 随倾角  $\alpha$  而改变(图 7)。当  $\alpha \geq 30^\circ$  时, 参数 q 值变化很小, 实际上与  $\alpha = 90^\circ$  时的 q

值一样, 但当  $\alpha < 30^\circ$  时, q 值随  $\alpha$  的减小而明显地增大。参数 m 的变化规律不同, 从

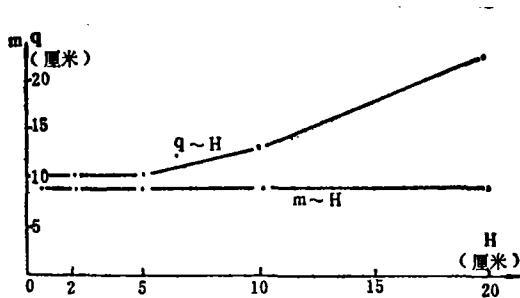


图10 参数m和q与岩脉厚度H的关系曲线  
h = 5厘米, L = 70厘米, d = 70厘米

$\alpha < 60^\circ$ 起, 参数m随 $\alpha$ 的减小而逐渐减小 (这时 $\rho_s$ 曲线不对称, 参数m是利用 $\rho_s$ 曲线的两翼分别求出的 $m_1$ 和 $m_2$ 取平均值得出的, 即 $m = (m_1 + m_2)/2$ 。

3. 当观测剖面与岩脉走向垂直并位于岩脉之上时, 剖面到岩脉中心之距离y的改变并不影响参数m和q的数值大小。当观测剖面越出脉岩并位于其外时, m值变化不大, 但q值却随y的增大而明显地增大 (图8)。

4. 当观测剖面不垂直于岩脉走向时, 自 $\varphi < 60^\circ$ 开始, 参数m和q便随 $\varphi$ 角的减小而明显变大 (图9)。

6. 岩脉厚度H的增大, 不会引起参数m的明显变化, 但当 $H > h$ 时, 参数q将随H的增大而变大 (图10)。

由此可见, 可以利用通过高阻岩(矿)脉上方、并垂直或近于垂直岩(矿)脉走向的中梯装置 $\rho_s$ 曲线的过拐点的弦切距m或半极值点间的弦长q, 按公式(1)或(2)来确定高阻岩(矿)脉的上顶埋深h。

下面我们来对比这两种求深度的方法——“m法”和“q法”, 并讨论应用它们确定深度的精度问题。

1. 当 $H > h$ , 或观测剖面位于岩(矿)脉之外(或附近)时, q值有显著的变化, 因而不能用“q法”求h, 但“m法”仍可以应用。

2. 当岩(矿)脉倾角 $\alpha < 60^\circ$ 时, 参数m值随 $\alpha$ 的减小而明显地变小, 这时如用“m法”确定深度, 误差将很大; 但在 $\alpha \geq 30^\circ$ 范围内, 用“q法”仍可以得到良好的结果。

3. 关于用“m法”和“q法”确定岩(矿)脉上顶埋深的精度问题。我们知道, 在利用实际 $\rho_s$ 曲线求参数m时, 并不是先在

$\rho_s$ 曲线上求“拐点”, 然后再过“拐点”作切线; 而是利用直尺与实测 $\rho_s$ 曲线的一侧靠拢, 然后划出一条与实测 $\rho_s$ 曲线重合最长而又最陡的直线, 作为过拐点的切线。设该切线与实测 $\rho_s$ 曲线重合段两端点的 $\rho_s$ 值分别为 $\rho_s^{(2)}$ 和 $\rho_s^{(1)}$ , 重合段的水平投影距离为 $\Delta X$  (见图2), 则参数

$$m = \frac{\rho_s^{\max} - \rho_1}{\rho_s^{(2)} - \rho_s^{(1)}} \Delta X$$

经过简单的微分运算可得:

$$\frac{dm}{m} = \frac{d\rho_s^{\max} - d\rho_1}{\rho_s^{\max} - \rho_1} - \frac{d\rho_s^{(2)} - d\rho_s^{(1)}}{\rho_s^{(2)} - \rho_s^{(1)}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{或 } \delta m = & \frac{\rho_s^{\max}}{M\rho_1} \delta\rho_s^{\max} - \frac{1}{M} \delta\rho_1 - \\ & - \frac{\rho_s^{(2)}}{\rho_s^{(2)} - \rho_s^{(1)}} \delta\rho_s^{(2)} + \\ & + \frac{\rho_s^{(1)}}{\rho_s^{(2)} - \rho_s^{(1)}} \delta\rho_s^{(1)} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $dm$  及  $\delta m = dm/m$  和  $d\rho_s^{\max}$  及  $\delta\rho_s^{\max} = d\rho_s^{\max}/\rho_s^{\max}$ ……等分别表示参数m和 $\rho_s^{\max}$ ……等的绝对误差和相对误差,  $M = (\rho_s^{\max} - \rho_1)/\rho_1$  为 $\rho_s$ 曲线的相对异常幅度。

(3)、(4)两式表示了各视电阻率值 $\rho_s^{\max}$ 、 $\rho_s^{(2)}$ 和 $\rho_s^{(1)}$ 的观测误差和选择围岩电阻率 $\rho_1$ 的误差, 与所引起的m值的误差之间的关系。从这两个公式可知:

①曲线相对异常M和切线与 $\rho_s$ 曲线重合段两端 $\rho_s$ 之差 $(\rho_s^{(2)} - \rho_s^{(1)})$ 越大, 则确定m值的误差越小。

②当 $\rho_1$ 、 $\rho_s^{\max}$ 、 $\rho_s^{(2)}$ 和 $\rho_s^{(1)}$ 这些电阻率值的绝对误差或相对误差相同时,  $\delta m = 0$ , 这就是说, 观测 $\rho_s$ 的系统误差不会引起m值发生误差。

③因为 $(\rho_s^{\max} - \rho_s^{(1)}) < \rho_s^{\max}$  和  $(\rho_s^{(2)} - \rho_s^{(1)}) < \rho_s^{(2)}$  及  $\rho_s^{(1)}$ , 所以确定m值的相对误差一般大于 $\rho_s$ 值的观测误差 (如果各项误差彼此不能互相抵消的话), 甚至大很多 (当 $\rho_s^{\max} - \rho_1$ 和 $\rho_s^{(2)} - \rho_s^{(1)}$ 很小时); 此外,  $\rho_s^{(2)}$ 和 $\rho_s^{(1)}$ 引起的误差, 要比 $\rho_s^{\max}$ 引起的误差大, 有时也会大很多 (当 $(\rho_s^{\max} - \rho_1) \gg (\rho_s^{(2)} - \rho_s^{(1)})$ 时)。

现在根据实验数据, 举两例来说明。对于  $L \times d = 150 \times 60$  厘米<sup>2</sup> 的高阻薄脉:

① 当其上顶埋深  $h = 2$  厘米时, 用  $AB = 300$  厘米的供电电极距, 所得  $\rho_s$  曲线 (图 1 曲线 1) 的  $\rho_s^{\max} = 82.1$  欧姆米,  $\rho_1 = 18.0$  欧姆米,  $\rho_s^{(2)} = 78.0$  欧姆米,  $\rho_s^{(1)} = 54.0$  欧姆米。按公式 (4) 可算得:

$$\delta m = 1.28\delta\rho_s^{\max} - 0.28\delta\rho_1 - 3.25\rho_s^{(2)} + 2.25\rho_s^{(1)}$$

设  $\delta\rho_s^{\max} = \delta\rho_1 = \delta\rho_s^{(2)} = \delta\rho_s^{(1)}$ , 则  $\delta m = 0$ , 此时误差最小。若  $\delta\rho_s^{\max} = -\delta\rho_1 = -\delta\rho_s^{(2)} = \delta\rho_s^{(1)} = \delta\rho$ , 则  $\delta m = 7.06\delta\rho$ , 这时确定  $m$  值的误差最大, 比电阻率的误差增大了七倍。

③ 当薄脉埋深增大到  $h = 30$  厘米时,  $\rho_s$  曲线 (图 1 曲线 6) 的异常变小:  $\rho_s^{\max} = 30.0$ ,  $\rho_1 = 18.0$ ,  $\rho_s^{(2)} = 29.2$ ,  $\rho_s^{(1)} = 26.6$  (单位均为欧姆米), 由公式 (4) 算得:

$$\delta m = 2.5\delta\rho_s^{\max} - 1.5\delta\rho_1 - 11.2\delta\rho_s^{(2)} - 10.2\delta\rho_s^{(1)}$$

同样, 当  $\delta\rho_s^{\max} = \delta\rho_1 = \delta\rho_s^{(2)} = \delta\rho_s^{(1)}$  时,  $\delta m = 0$ 。但当  $\delta\rho_s^{\max} = -\delta\rho_1 = -\delta\rho_s^{(2)} = \delta\rho_s^{(1)} = \delta\rho$  时,  $\delta m = 25.4\delta\rho$ , 这时确定  $m$  值的误差更大, 竟增大到 25 倍多!

实际上,  $\delta\rho_s^{(2)}$  和  $\delta\rho_s^{(1)}$  一般可保证 5% 的精度; 但选择  $\rho_1$  比较困难,  $\delta\rho_1$  往往可达 20%~30%; 此外, 当测点不够密时, 容易漏掉  $\rho_s$  极大值, 因而  $\delta\rho_s^{\max}$  也可达 10% 以上。故由实际曲线确定  $m$  值的误差  $\delta m$  一般是很大的。用 “ $m$  法” 求  $h$  只在相对异常  $M$  较大和曲线较陡 (因而  $\rho_s^{(2)} - \rho_s^{(1)}$  较大) 时才比较准确, 即使在这种情况下, 参数  $m$  的相对误差, 也就是确定深度的相对误差  $\delta h$ , 也能达到 20~50%。

利用实测  $\rho_s$  曲线求半极值弦长  $q$  则比较简单而且也较精确。但是经验证明, 确定  $q$  值也只是在异常值较大 (至少  $M > 40\%$ , 这时半极值才在干扰水平 40% 以上) 和半极值点位于  $\rho_s$  曲线之陡峭段上的情况下, 才能得到较高的精度, 否则误差也将达  $n \cdot 10\%$ 。

根据以上讨论可知, 确定深度的 “ $m$  法” 和 “ $q$  法” 各有利弊; 因而在作推断解释时, 应当尽可能两种方法同时并用、互相对照。但由于从实际曲线上求  $q$  比求  $m$  值更准确, 因此, 当岩 (矿) 脉厚度不大 ( $H <$

$h$ ) 时, 应该重视 “ $q$  法” 求得的深度。

为了判断岩 (矿) 脉之厚薄, 可以利用实测  $\rho_s$  曲线之参数  $\Pi$ :

$$\Pi = 2\Delta / (2\Delta + 2m) \quad (5)$$

式中,  $2\Delta$  为  $\rho_s$  曲线两翼过拐点的切线与直线  $\rho_s = \rho_s^{\max}$  之两交点间的水平距离 (见图 2)。实验证明, 当  $\Pi \leq 0.15$  时, 可将岩 (矿) 脉视为薄脉 ( $H \leq h$ ), 因而可用 “ $q$  法” 求其深度。

以上讨论都是对视电阻率  $\rho_s$  曲线来说的。根据等效电阻率的概念, 地质体的激发极化效应等效于其电阻率的相应增高。所以, 高级化体的视极化率  $\eta_s$  异常与高阻体上的  $\rho_s$  异常形状相似。因此, 前面对  $\rho_s$  曲线总结出的实验公式以及对其应用所作的讨论, 也可近似地应用于  $\eta_s$  曲线的推断解释。

## 实 例

例 1 在辽宁某镍矿, 根据中梯装置的中梯  $\rho_s$  曲线成功地追索了覆盖层 (十余米) 下的含矿石英脉。图 11 是其中的一条剖面线, 在高阻的含矿石英脉上  $\rho_s$  曲线有明显的异常; 但受局部不均匀的影响,  $\rho_s$  曲线有一些小的无规律的 “跳跃”。将曲线圆滑后, 求得左、右两翼的弦切距分别为  $m_1 = 23$  米和  $m_2 = 17$  米。其平均值为 20 米, 按 (1) 式求出含矿石英脉的上顶深度  $h \approx 0.6m = 12$  米。此解释推断结果与山地工程揭露的矿脉深度十分相近。

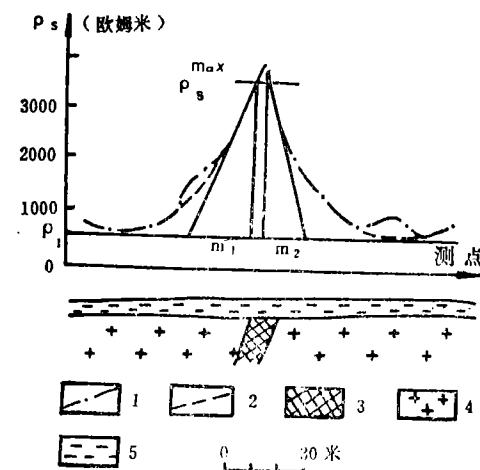


图 11 辽宁某镍矿含矿石英脉上的中梯装置  $\rho_s$  曲线

1—原始曲线; 2—圆滑后的曲线; 3—含矿石英脉; 4—花岗闪长岩; 5—浮土

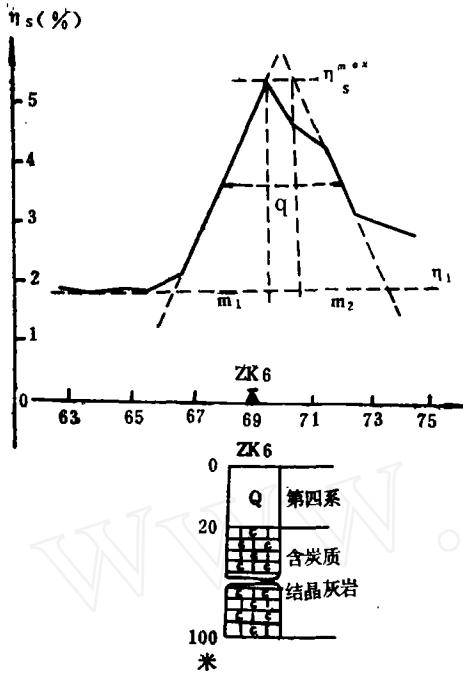


图12 广东某地炭质结晶灰岩上的中梯装置 $\eta_s$ 曲线

例2 在广东某地炭质结晶灰岩上测得的激电( $\eta_s$ )异常示于图12。量得该 $\eta_s$ 曲线的半极点弦长 $q$ 为40米；求得其弦切距为 $m_1$

$= 32.2$ 米和 $m_2 = 28.8$ 米，其平均值为 $30.5$ 米，将所得的 $q$ 和 $m$ 值，分别代入(1)式和(2)式，求出极化体——含炭质结晶灰岩的深度： $h_q \approx 0.5q = 20$ 米

$$h_m \approx 0.6m = 18.3 \text{米}$$

所算出的深度(尤其是“ $q$ 法”求出的深度 $h_q$ )，与钻孔Zk-6查明的炭质结晶灰岩的深度(20米)吻合得很好。

### 几点结论

利用“ $m$ 法”求 $h$ 的必要条件是岩(矿)脉倾角 $\alpha \geq 60^\circ$ ；而应用“ $q$ 法”求 $h$ 的必要条件是岩(矿)脉厚度 $H \leq h$ ，此条件是否满足可根据参数 $\Pi$ 来判断。

当用“ $m$ 法”或“ $q$ 法”确定 $h$ 时，应在岩(矿)脉范围内，垂直其走向( $\varphi \geq 60^\circ$ )布置精测剖面。

精测剖面的点距应足够小(特别是在曲线的极值点和拐点附近)，同时剖面长度必须达到“正常场”。

利用“ $m$ 法”和“ $q$ 法”求深度 $h$ 的共同有利条件是 $\rho_s$ 或 $\eta_s$ 曲线的异常大和梯度大。一般“ $q$ 法”比“ $m$ 法”方便，精度也较高；但最好两种方法都同时用，以便对比所求得的结果。

## 板状体模型实验激发测深法的推断解释

冶金地质会战指挥部物探第二大队 季祝林

在激发测深法中，在理论上至今尚无可供定量计算板状体的解析公式。本文根据板状体的水槽模型实验结果，提出一种新的解释方法。沿板状体走向激发测深法称为横向激发装置，而垂直板状体走向的激发测深法则称为纵向激发装置，从理论上来看，二者并没有什么根本差别，因此横向激发测深法一些实验结论，也可推广用于垂向激发测深法的成果解释。

### 水槽铜板模型实验与分析

水槽用砖和水泥砌成，容积是 $2.7 \times 1.1 \times 1.52$ 米<sup>3</sup>。以黄铜板作板状体模型( $\eta_{\text{铜}} = 96\%$ )。槽内充自来水( $\eta_{\text{水}} = 0.45\%$ )，按不同角度在水槽内将铜板模型四角吊起，调

节水面以调整铜板在水中的埋深。供电电极用方形小铜板制成，测量电极是用眼药水瓶制成的小型不极化电极。将AB, MN电极固定在特制的木尺上，可以沿测线移动，用DDC-2型电子自动补偿仪和激电法配电盘进行单值取样读数。

图1是铜板沿走向方向在水中的投影断面图，铜板埋深10厘米，以双短脉冲供电激发，正反向供电10秒，断电后0.25秒进行激电法单值取样。图1列出了三个测深点上的测量结果。中间的一条测深曲线直接反映出铜板的存在，曲线的拐点B与铜板的埋深对应，两侧测深点上测得的曲线呈K型与自来水对应，但仍受铜板边界的影响。对图1中间那条测深曲线进行了检查观测，检查结果表