

## 一、电阻率法的理论基础

### 1. 电阻率

岩(矿)石间的电阻率差异是电阻率法的物理前提。电阻率是描述物质导电性能的一个电性参数。从物理学中我们已经知道,当电流沿着一段导体的延伸方向流过时,导体的电阻  $R$  与其长度  $l$  成正比,与垂直于电流方向的导体横截面积  $S$  成反比。即

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (4-1-1)$$

式中比例系数  $\rho$  称为该导体的电阻率。将(4-1-1)式改写成

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (4-1-2)$$

显然,电阻率在数值上等于电流垂直通过单位立方体截面时,该导体所呈现的电阻。岩、矿石的电阻率值越大,其导电性就越差;反之,则导电性越好。

在 SI 制中,电阻  $R$  的单位为  $\Omega$  (欧姆),长度  $l$  的单位为  $m$ ,截面积  $S$  的单位为  $m^2$ ,故电阻率的单位为  $\Omega \cdot m$  (欧姆·米)。

### 2. 电阻率公式及视电阻率

#### (1) 电阻率公式

电阻率法工作中,通常是在地面上任意两点用供电电极  $A$ 、 $B$  供电,在另两点用测量电极  $M$ 、 $N$  测定电位差(图 4-1-1)。

电阻率的计算公式

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (4-1-3)$$

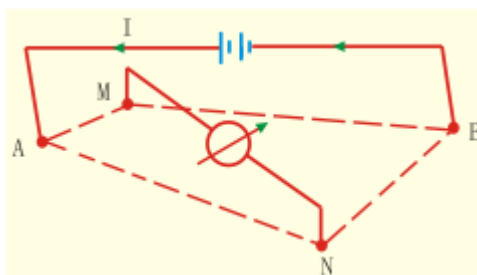


图 4-1-1 任意四装极置示意图

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (4-1-4)$$

令

$$\rho = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (4-1-5)$$

则 (4-1-3) 式变为

(4-1-5)式是利用四极装置测定均匀各向同性半空间电阻率的基本公式。式中  $K$  称为装置系数 (或排列系数), 它是一个与各电极间的距离有关的物理量。在野外工作中, 装置形式和极距一经确定,  $K$  值便可计算出来。

获得岩石电阻率的方法之一, 是用小极距的四极装置在岩石露头上进行测定, 称为露头法。此外, 通过电测井或标本测定也可以获得岩石的电阻率。

## (2)视电阻率

(4-1-5)式是在地表水平, 地下介质均匀各向同性的假设下导出的。实际工作中地下介质往往呈各向异性非均匀分布, 且地表也不水平, 因此有必要研究这种情况下的稳定电场。

首先需要引入“地电断面”的概念。所谓地电断面, 是指根据地下地质体电阻率的差异而划分界线的断面。这些界线可能同地质体、地质层位的界线吻合, 也可能不一致。图 4-1-2 中的地电断面中分布呈倾斜接触, 电阻率分别为  $\rho_1$  和  $\rho_2$  的两种岩层, 还有一个电阻率为  $\rho_3$  的透镜体。向地下通电并进行测量, 也可以按(4-1-5)式求出一个“电阻率”值。不过, 它既不是  $\rho_1$ , 也不是  $\rho_2$  和  $\rho_3$ , 而是与三者都有关的物理量。用符号  $\rho_s$  表示, 并称之为视电阻率。即

$$\rho_s = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (4-1-6)$$

视电阻率实质上是在电场有效作用范围内各种地质体电阻率的综合影响值。虽然(4-1-5)和(4-1-6)式等号右端的形式完全相同, 但左端的  $\rho$  和  $\rho_s$  却是两个完全不同的概念。只有在地下介质均匀且各向同性的情况下,  $\rho$  和  $\rho_s$  才是等同的。

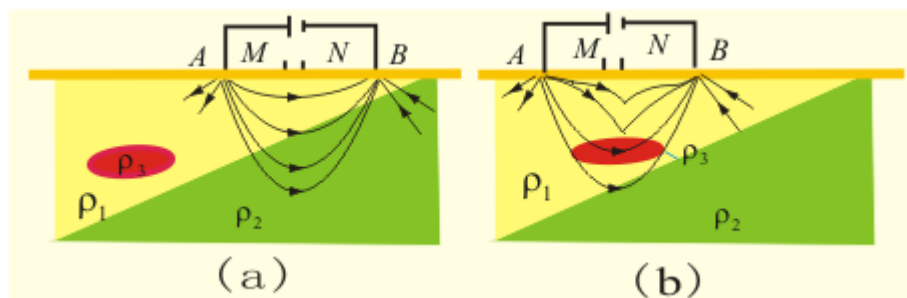


图 4-1-2 四极装置建立的电场在地电断面中的分布

影响视电阻率的因素有:

- (1)电极装置的类型及电极距;
- (2)测点位置;
- (3)电场有效作用范围内各地质体的电阻率;
- (4)各地质体的分布状况, 包括它们的形状、大小、厚度、埋深和相互位置等。

## 3. 电阻率法的实质

为了揭示视电阻率变化与地下电场分布之间的关系, 我们引入视电阻率的微分表示式。

在地表不平、地下岩、矿石导电性分布不均匀的条件下, 对于测量电极距  $MN$  很小的梯度装置来说,  $MN$  范围内的电场强度和电流密度均可视为恒定不变的常量。经推导得出视电阻率的微分形式:

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \cdot \rho_{MN} \frac{1}{\cos \alpha} \quad (4-1-7)$$

式中  $j_{MN}$  和  $\rho_{MN}$  分别表示  $MN$  处的电流密度和电阻率,  $\alpha$  为  $MN$  处地形坡角,  $j_0$  为地表水平、地下为半无限均匀岩石条件下的电流密度。

式 (4-1-7) 为起伏地形条件下, 视电阻率的微分表示式。其应用条件是测量电极距  $MN$  较小。显然, 如果地面水平, 只是地下赋存有导电性不均匀体时, 上式简化为:

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \cdot \rho_{MN} \quad (4-1-8)$$

在对视电阻率曲线进行定性分析时，经常用到式（4-1-7）和式（4-1-8）。

图 4-1-3 中示出了三种不同的地电断面，若采用同样极距的四极装置，分别于地表测量视电阻率  $\rho_s$  时，将会得到不同的观测结果。图 4-1-3（a）中地下为均匀、各向同性的单一岩石，其电阻率为  $\rho_1$ 。正如前面我们讨论测定均匀大地电阻率的情况，这时测得的视电阻率  $\rho_s$  就等于岩石的真电阻率值  $\rho_1$ 。图 4-1-3（b）是在电阻率等于  $\rho_1$  的围岩中，赋存一良导电矿体，其电阻率  $\rho_2 < \rho_1$ 。良导电矿体的存在改变了均匀岩石中电场分布的状况，电流汇聚于导体的结果，使地表测量电极 MN 附近岩石中的电流密度  $j_{MN}$  比均匀岩石情况下那里的正常电流密度  $j_0$  减小，于是式（4-1-8）中  $j_{MN}$  和  $j_0$  的比值小于 1，由于图 4-1-3（b）情况下的  $\rho_{MN} = \rho_1$ ，故由式（4-1-8）得知，此时的视电阻率  $\rho_s$  小于均匀围岩的真电阻率  $\rho_1$ 。图 4-1-3（c）是在电阻率等于  $\rho_1$  的围岩中，赋存一局部隆起的高阻基岩，其电阻率  $\rho_3 > \rho_1$ 。高阻基岩向地表排挤电流，使测量电极 M、N 附近岩石中的电流密度比均匀岩石条件下增大，式（4-1-8）中  $j_{MN}$  和  $j_0$  的比值大于 1， $\rho_{MN} = \rho_1$ ，于是图 4-1-3（c）条件下地面测得的视电阻率  $\rho_s > \rho_1$ 。

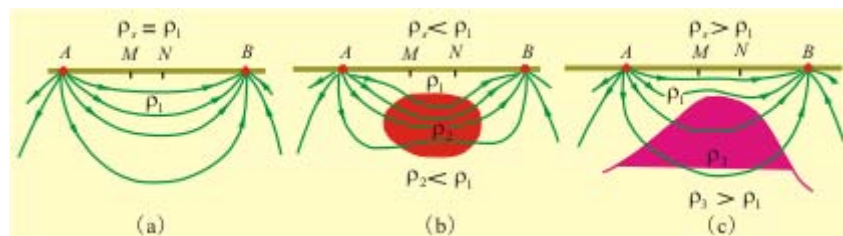


图 4-1-3 视电阻率与地电断面性质的关系

（a）均匀岩石；（b）围岩中赋存良导电矿体；（c）围岩中赋存高阻岩体

## 二、电阻率法的仪器及装备

根据(4-1-6)式，电阻率法测量仪器的任务就是测量电位差  $\Delta V_{MN}$  和电流  $I$ 。为适应野外条件，仪器除必须有较高的灵敏度、较好的稳定性、较强的抗干扰能力外，还必须要有较高的输入阻抗，以克服测量电极打入地下而产生的“接地电阻”对测量结果的影响。

## 三、电剖面法

电剖面法是电阻率法中的一个大类，它是采用不变的供电极距，并使整个或部分装置沿观测剖面移动，逐点测量视电阻率  $\rho$  的值。由于供电极距不变，探测深度就可以保持在同一范围内，因此可以认为，电剖面法所了解的是沿剖面方向地下某一深度范围内不同电性物质的分布情况。1. 联合剖面法

### (1) 装置形式及视电阻率公式

联合剖面法是用两个三极装置  $AMN\infty$  和  $\infty MNB$  联合进行探测的一种电剖面方法。如图 4-1-5 所示，A、M、N、B 四个电极位于同一测线上，以 M、N 之间的中点为测点，且  $AO=BO$ 、 $MO=NO$ 。电极 C 是两个三极装置共同的无穷远极，一般敷设在测线的中垂线上，与测线的距离大于 AO 的 5 倍。工作中将 A、M、N、B 四个电极沿测线一起移动，并保持各电极间的距离不变。在每个测点上分别测出 A、C 极供电时的电位差  $\Delta V_{MNA}$  和电流强度  $I$ ；B、C 极供电时的电位差  $\Delta V_{MNB}$  和电流强度  $I$ ，然后按(4-1-9)式分别求得两个视电阻率值  $\rho_{sA}$  和  $\rho_{sB}$ ，即

$$\rho_s^A = K_A \frac{\Delta V_{MN}^A}{I} (\text{AMN}\infty \text{装置})$$

$$\rho_s^B = K_B \frac{\Delta V_{MN}^B}{I} (\infty \text{MNB装置})$$
(4-1-9)

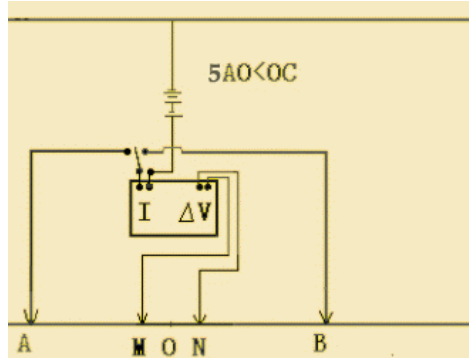


图 4-1-5 联合剖面法装置示意图

式中  $K_A$  和  $K_B$  分别为  $\text{AMN}\infty$  装置和  $\infty \text{MNB}$  装置的装置系数，根据(4-1-4)式可推算出

$$K_A = K_B = 2\pi \frac{AM \cdot AN}{MN}$$
(4-1-10)

因此，联合剖面法有两条视电阻率曲线。

#### (2)联合剖面法 $\rho_s$ 曲线的分析

联合剖面法主要用于寻找产状陡倾的层状或脉状低阻体或断裂破碎带。当供电电极距大于这些地质体的宽度时，可以把它们视为薄脉状良导体，因此，我们主要分析良导薄脉的联合剖面  $\rho_s$  曲线特征。实际工作中，由于 C 极置于无穷远处，其电场在 M、N 产生的电位差可以忽略不计，因此联合剖面法的电场属于一个点电源的场。图 4-1-6 示出了直立良导薄脉上的联合剖面法观测结果，我们先对  $\rho_{sA}$  曲线进行分析。

【a】当电极 A、M、N 在良导薄脉左侧且与之相距较远时，薄板对电流分布影响很小，因而  $j_{MN} = j_0$ 。由于  $\rho_{MN} = \rho_1$ ，故有  $\rho_{sA} = \rho_1$  (曲线上点 1)；

【b】当 A、M、N 逐渐移近良导薄脉时，薄脉向右“吸引”由 A 极发出的电流，使 M、N 间的电流密度增大，即  $j_{MN} > j_0$ ，故  $\rho_{sA} > \rho_1$ ， $\rho_{sA}$  曲线上升(曲线上点 2)；

【c】随着 A、M、N 继续向右移动，良导薄脉对电流的“吸引”逐渐增强，致使  $\rho_{sA}$  曲线继续上升，并达到极大值(曲线上点 3)；

【d】当 M、N 靠近并越过脉顶时，薄脉向下“吸引”电流，使得 M、N 间电流密度反而减少，即  $j_{MN} < j_0$ ， $\rho_{sA}$  开始迅速下降。当 A 和 M、N 分别在薄板两侧移动时，绝大部分电流被“吸引”到薄脉中去，由于薄脉的屏蔽作用，造成 M、N 间的电流密度更小，因而  $\rho_{sA}$  曲线出现一段平缓的低值带(曲线上点 4 附近一小段)；

【e】当 A、M、N 都越过脉顶后，低阻脉向左“吸引”电流。随着电极向右移动，“吸引”作用逐渐减弱，故  $j_{MN}$  逐渐增大， $\rho_{sA}$  曲线上升(曲线上点 5)；

【f】A、M、N 继续右移，当远离低阻脉时，薄脉对电流的“吸引”十分微弱，因而对电流的畸变作用可以忽略不计， $j_{MN} \approx j_0$ ，故  $\rho_{sA}$  曲线逐渐趋于  $\rho_1$  (曲线上点 6)。

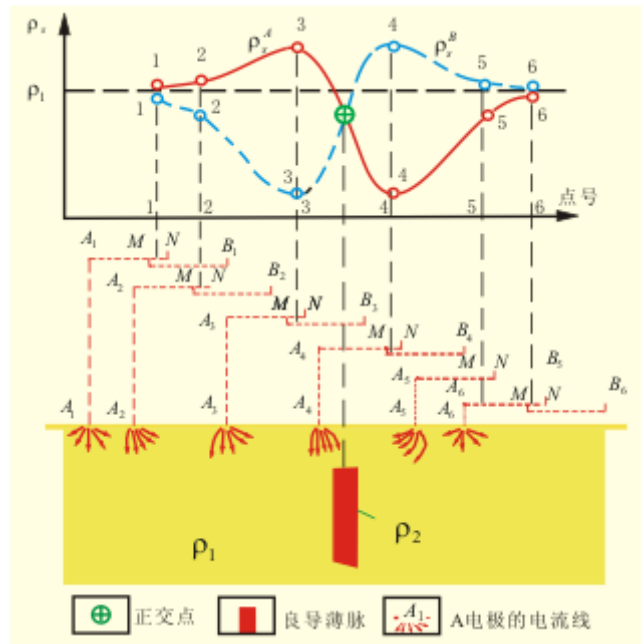


图 4-1-6 直立良导薄脉上的联合剖面曲线的分析  
1—正交点；2—良导薄脉；3—A 电极的电流线(示意图)

用同样的方法可以分析  $\rho_{sB}$  曲线，由于 A、M、N 自左至右移动与 M、N、B 自右至左移动时视电阻率曲线的变化规律相同。因此，只须将  $\rho_{sA}$  曲线绕薄脉转动  $180^\circ$ ，即可得到  $\rho_{sB}$  曲线。由图 4-1-6 可见，在直立良导薄脉顶部上方， $\rho_{sA}$  和  $\rho_{sB}$  曲线相交，且在交点左侧， $\rho_{sA} > \rho_{sB}$ ，交点右侧， $\rho_{sA} < \rho_{sB}$ 。这种交点称为联合剖面曲线的“正交点”。在正交点两翼，两条曲线明显地张开，一条达到极大值，另一条达到极小值，形成横“8”字形的明显特征。

图 4-1-7 是直立高阻薄脉上方的联合剖面  $\rho_s$  曲线。这里不再详细分析  $\rho_{sA}$  和  $\rho_{sB}$  曲线的变化规律，只把它们和低阻薄脉上的曲线作一个对比。可以看出，高阻薄脉上的两条  $\rho_s$  曲线也有一个交点。但交点左侧  $\rho_{sA} < \rho_{sB}$ ，右侧  $\rho_{sA} > \rho_{sB}$ ，与低阻薄脉的情况恰好相反，所以称为“反交点”。联合剖面曲线的反交点实际上并不明显， $\rho_{sA}$  和  $\rho_{sB}$  曲线近于重合，各自呈现一个高阻峰值，且交点两侧  $\rho_{sA}$  和  $\rho_{sB}$  曲线靠得很拢，没有明显的横“8”字形特征。这是因为对于高阻薄脉而言，无论 M、N 在它的哪一侧， $\rho_s$  值都是降低的。例如，对  $\rho_{sA}$  曲线而言，当 A、M、N 在薄脉左侧时，高阻薄脉向左“排斥”电流，故  $\rho_{sA}$  值下降；当 M、N 位于薄脉顶部时，由于 A 极发出的电流被“排斥”到地表，故  $\rho_{sA}$  出现极大值；当 M、N 达到薄脉右侧而 A 还在左侧时，则由于高阻体“排斥”电流(起高阻屏蔽作用)而使  $\rho_{sA}$  值降至极小；A、M、N 都在高阻薄脉右侧时， $\rho_{sA}$  值随电极排列的右移先稍有上升，然后下降，直至  $\rho_{sA}$  趋于  $\rho_1$  为止。由此可见，虽然利用联合剖面法在直立高阻薄脉上也有异常显示，但其效果比在直立低阻薄脉上差，加之与其它对高阻薄脉同样有效的电剖面法相比，它的效率又低，因此，一般都不用联合剖面法寻找高阻地质体。

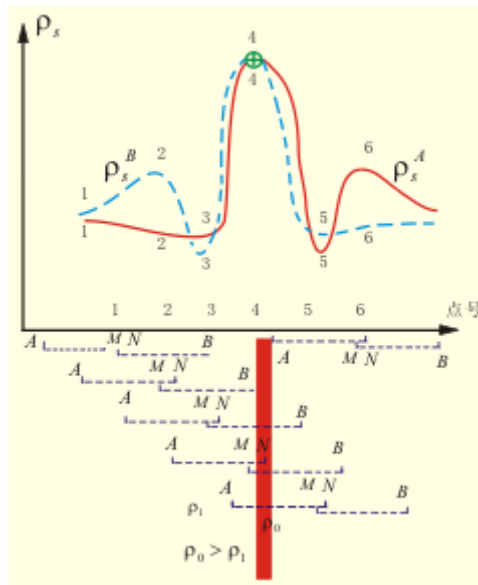


图 4-1-7 直立高阻薄脉上联合剖面模型试验曲线

1—正交点；2—良导薄脉；3—A 电极的电流线(示意图)

图 4-1-8 是不同倾角  $\alpha$  情况下良导薄脉的模型实验曲线。由图可见，当  $\alpha < 90^\circ$  时，两条  $\rho_s$  曲线是不对称的。这是由于倾斜的低阻薄脉向下吸引电流时，使得倾斜方向上的  $\rho_s$  曲线普遍下降所致。由于曲线不对称，正交点也略向倾斜方向位移。



图 4-1-8 不同倾角良导薄脉上的联合剖面  $\rho_s$  曲线

(实线为  $\rho_s^A$  曲线，虚线为  $\rho_s^B$  曲线)

实际工作中，可以用不同极距的联合剖面曲线交点的位移来判断地质体的倾向。小极距反映浅部情况，大极距反映深部情况。若大、小极距的低阻正交点位置重合，说明地质体直立(图 4-1-9(b))；若大极距相对于小极距低阻正交点有位移，说明地质体倾斜。

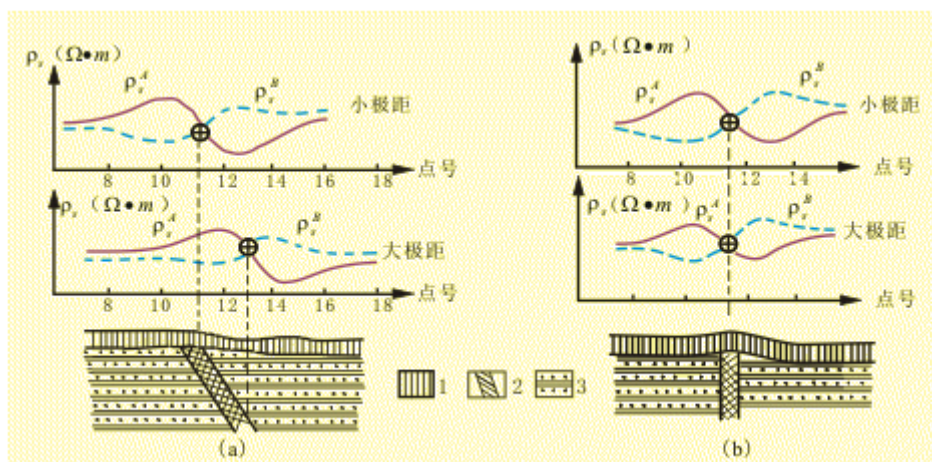


图 4-1-9 不同极距  $\rho_s$  对比曲线同构造倾向的关系示意图

(a)倾斜断层；(b)直立断层

1—表土层；2—断层；3—高阻石英岩

中间梯度法的装置特点如图 4-1-10 所示。这种装置的供电电极距  $AB$  很大，通常选取为覆盖层厚度的 70~80 倍。测量电极距  $MN$  相对于  $AB$  要小得多，一般选用  $MN=(1/50\sim 1/30)AB$ 。工作中保持  $A$  和  $B$  固定不动， $M$  和  $N$  在  $A$ 、 $B$  之间的中部约  $(1/3\sim 1/2)AB$  的范围内同时移动，逐点进行测量，测点为  $MN$  的中点。中间梯度法的电场属于两个异性点电源的电场。在  $AB$  中部  $(1/3\sim 1/2)AB$  的范围内电场强度(即电位的负梯度)变化很小，电流基本上与地表平行，呈现出均匀场的特点。这也就是中间梯度法名称的由来。中间梯度法的电场不仅在  $A$ 、 $B$  连线中部是均匀的，而且在  $A$ 、 $B$  连线两侧  $1/6AB$  范围内的测线中部也近似地是均匀的，所以不仅可以在  $A$ 、 $B$  两电极所在的测线上移动  $M$ 、 $N$  极进行测量，而且可以在  $AB$  连线两侧  $1/6AB$  范围内的测线上移动  $M$ 、 $N$  极进行测量。中间梯度法这种“一线布极，多线测量”的观测方式，比起其它电剖面方法(特别是联合剖面法)来，其生产效率要高得多。中间梯度法的视电阻率按(4-1-6)式计算

$$\rho_s = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (4-1-11)$$

其中装置系数

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (4-1-12)$$

但必须指出，装置系数  $K$  不是恒定的，测量电极每移动一次都要计算一次  $K$  值。

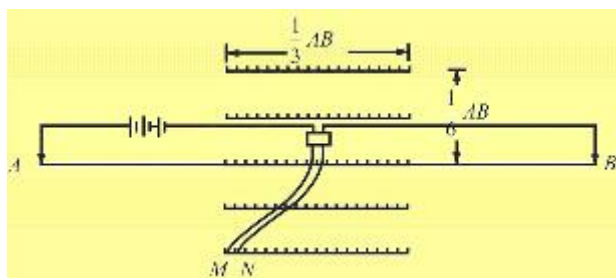


图 4-1-10 中间梯度法装置示意图

中间梯度法主要用于寻找产状陡倾的高阻薄脉，如石英脉、伟晶岩脉等。这是因为在均匀场中，高阻薄脉的屏蔽作用比较明显，排斥电流使其汇聚于地表附近， $jMN$ 急剧增加，致使 $\rho_s$ 曲线上升，形成突出的高峰。至于低阻薄脉，由于电流容易垂直于它通过，只能使 $jMN$ 发生很小的变化，因而 $\rho_s$ 异常不明显(图 4-1-11)。

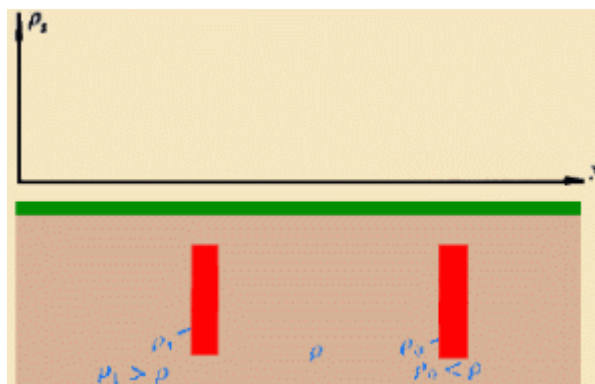


图 4-1-11 高、低阻直立薄脉上的中间梯度法 $\rho_s$ 曲线

图 4-1-12 是在我国东北某铅锌矿区使用中间梯度法所得的 $\rho_s$ 剖面平面图。该区铅锌矿产在倾角接近  $70^\circ$  的高阻石英脉中。图中两条连续的 $\rho_s$ 高峰值带由含矿石英脉引起。右边 1 号矿脉是已知的，左边 2 号矿脉是根据中间梯度法的 $\rho_s$ 曲线形态，与 1 号矿脉的 $\rho_s$ 曲线对比而圈定的。

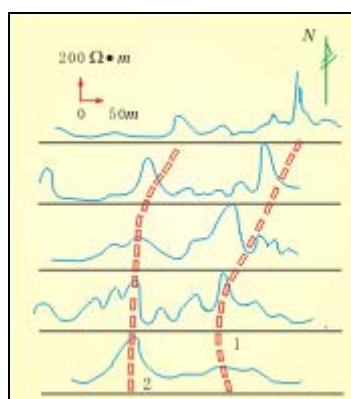


图 4-1-12 某铅锌矿区中间梯度法 $\rho_s$ 剖面平面图

思考：为什么把上述的这种装置方式叫“中间梯度法”？其电场有什么特点？

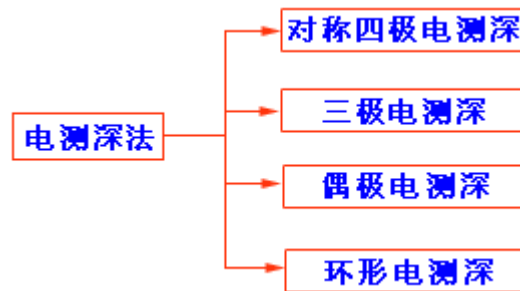
参考答案：中间梯度法在AB中部(1/3~1/2)AB范围内电场强度(即电位的负梯度)变化很小，电流基本上与地表平行，呈现均匀场特点，所以称之为中间梯度。其电场不仅在AB连线部是均匀的，而且在两侧1/6AB范围内的测线中部也近似是均匀的，它不仅可以在AB所在测线上测量，也可以在1/6AB范围内测量。这种“一线布极，多线测量”生产效率高。

## 四、电测深法

### 1. 概述

电测深法是探测电性不同的岩层沿垂向分布情况的电阻率方法。该方法采用在同一测点上多次加大供电电极距的方式，逐次测量视电阻率 $\rho_s$ 的变化。我们知道，适当加大供电电极距可以增大勘探深度，因此，在同一测点上不断加大供电电极距所测出的 $\rho_s$ 值的变化，将反映出该测点下电阻率有差异的地质体在不同深度的分布状况。

按照电极排列方式的不同，电测深法又可以分为对称四极电测深、三极电测深、偶极电测深、环形电测深等方法，其中最常用的是对称四极电测深，所以我们主要讨论这种方法。今后如无特殊说明，我们所说的电测深都是指对称四极电测深。□



对称四极电测深的装置形式与对称剖面法完全相同，因此，其视电阻率和装置系数的表达式也是一致的。即

$$\rho_s = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad K = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN}$$

但是，由于电测深法是在同一测点上每增大一次极距  $AB$ ，就计算一个  $K$  值，因此，其  $K$  值是变化的，这又是与对称剖面法中  $K$  为恒值不同之处。下面我们以两个电性层组成的地电断面为例，说明电测深法的工作原理。

思考

1、为什么电测深法能够测量出地质体在不同深度的分布况？



2、常用电测深法是哪一种？



参考答案：由于电测深法是同一测点上多次加大供电电极距的方式工作，它测出的  $\rho_s$  值的变化，将反映出该测点下电阻率有差异的地质体在不同深度的分布状况。

设第一层电阻率为  $\rho_1$ ，厚度为  $h_1$ ，第二层电阻率为  $\rho_2$ ，且  $\rho_2 > \rho_1$ ，厚度  $h_2$  为无穷大，分界面为水平面(图 4-1-13)。实际工作中，如果浮土覆盖着基岩，而基岩表面与地面都接近于水平时，就相当于这里所讨论的二层地电断面。如图 4-1-13 所示，当  $AB/2$  很小时 ( $AB/2 \ll h_1$ )，由于所能达到的探测深度很浅， $\rho_2$  介质对电流分布尚无影响，可认为全部电流都分布在第一层中。由于  $\rho_{MN} = \rho_1$ 、 $j_{MN} = j_0$ ，故  $\rho_s = \rho_1$ ，表现为电测深曲线开始的一小段平行于横坐标( $AB/2$ )轴。

当  $AB/2$  逐渐增大，电流分布的深度也相应增大。从某一  $AB/2$  开始，电流分布达到  $\rho_2$  介质，由于高阻介质  $\rho_2$  排斥电流，因而  $j_{MN} > j_0$ ， $\rho_s > \rho_1$ ，电测深曲线开始上升。随着  $AB/2$  继续增大， $\rho_2$  介质排斥电流的作用更加显示， $\rho_s$  值继续增大，曲线不断上升。当  $AB/2 \gg h_1$ ，绝大部分电流都流入第二层， $\rho_1$  介质对  $\rho_s$  的影响极小，可以认为地下充满了  $\rho_2$  介质，于是  $\rho_{MN} = \rho_2$ ， $j_{MN} = j_0$ ，因而  $\rho_s \rightarrow \rho_2$ ，曲线尾部以  $\rho_2$  为渐近线。

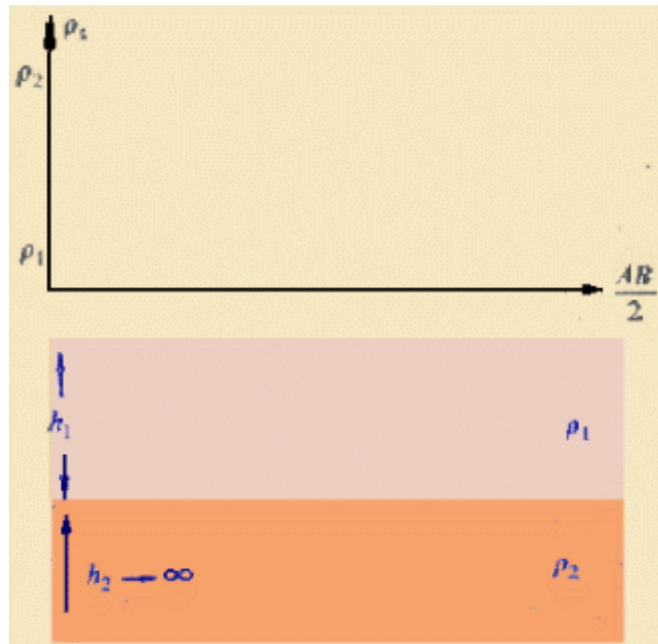


图 4-1-13 二层地电断面电测深曲线的分析

综上所述，电测深曲线的变化与地电断面中各电性层的电阻率以及厚度都有密切的关系，因此，可以通过电测深曲线推断地下电性层的电阻率和埋深。再结合地质资料进行综合对比，把电性层与地质上的岩层联系起来，就可能解决所提出的地质问题。

电测深法适宜于划分水平的或倾角不大( $<20^\circ$ )的岩层，在电性层数目较少的情况下，可进行定量解释。

## 2. 电测深曲线类型

为便于分析解释电测深曲线，可以按地电断面的类型，将电测深曲线分为以下几种类型：

### (1) 二层断面的电测深曲线类型

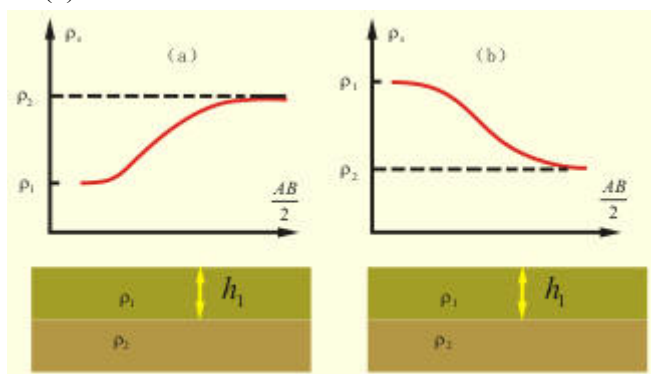


图 4-1-14 水平二层断面与二层电测深曲线  
(a)G 型；(b)D 型

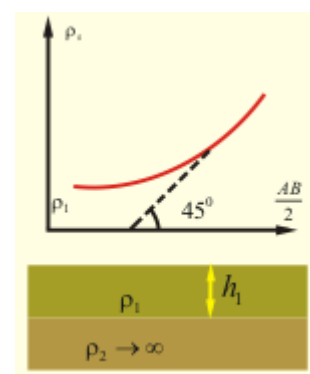


图 4-1-15 底层电阻率  $\rho_2 \rightarrow \infty$  的水平两层电测深曲线

如前所述，二层地电断面具有  $\rho_1$  和  $\rho_2$  两个电性层，设第一层厚度为  $h_1$ ，第二层厚度  $h_2$  为无穷大。

按  $\rho_1$  和  $\rho_2$  的组合关系，可将地电断面分为  $\rho_1 > \rho_2$  和  $\rho_1 < \rho_2$  两种类型。与二层断面相对应的电测深曲线称为二层曲线。其中对应于  $\rho_1 > \rho_2$  断面的曲线定名为 D 型曲线，对应于  $\rho_1 < \rho_2$  断面的定名为 G 型曲线(图 4-1-14)。前面已经分析了 G 型曲线，对 D 型曲线也可以作类似的分析。

实际工作中,还有一种常见的情况是第二层电阻率  $\rho_2$  相对于  $\rho_1$  为无限大,此时二层曲线尾部呈斜线上升。在对数坐标上,其渐近线与横轴成  $45^\circ$  相交(图 4-1-15)。

### (2)三层断面的电测深曲线类型

三层地电断面由三个明显的电性层组成,各电性层的电阻率分别为  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  和  $\rho_3$ ,设第一、二层厚度分别为  $h_1$  和  $h_2$ ,第三层厚度  $h_3$  为无穷大。按照三个电性层参数的组合关系,可将三层电测深曲线分为下述四种类型(图 4-1-16)。

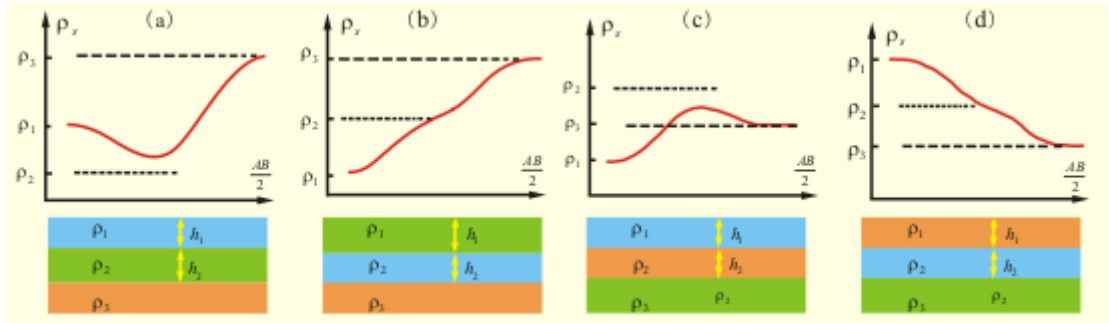


图 4-1-16 水平三层断面与三层电测深曲线

(a) H 型; (b) A 型; (c) K 型; (d) Q 型

1)H 型 对应于  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$  的地电断面。曲线前段渐近线决定于  $\rho_1$ ,尾段渐近线决定于  $\rho_3$ ,但中段  $\rho_s$  值则决定于三个电性层的综合影响。H 型曲线具有极小值  $\rho_{smin}$ ,一般情况下  $\rho_{smin} > \rho_2$ , (图 4-1-16(a))。只是当  $h_2 \gg h_1$  时,  $\rho_{smin}$  才趋于  $\rho_2$ ,此时  $\rho_s$  曲线中段出现宽缓的极小值段。如果  $\rho_3 \rightarrow \infty$ ,则 H 型曲线尾部将呈斜线上升,其渐近线与横轴成  $45^\circ$  相交。

2)A 型 对应于  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$  的三层断面。其特点是  $\rho_s$  曲线由  $\rho_1$  值开始逐渐上升,达  $\rho_2$  值时形成一个转折,第二层愈厚,转折愈明显,最后趋于  $\rho_s$  值(图 4-1-16(b))。在  $\rho_3 \rightarrow \infty$  时, A 型曲线尾部渐近线也与横轴成  $45^\circ$  相交。

3)K 型 对应于  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$  的三层断面。其特点是有  $\rho_s$  极大值  $\rho_{smax}$ ,一般  $\rho_{smax}$  小于  $\rho_2$ (图 4-1-16(c))。只有当  $h_2 \gg h_1$  时,  $\rho_{smax}$  才趋于  $\rho_2$ 。

4)Q 型 对应于  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$  的三层断面。其特点是  $\rho_s$  曲线由  $\rho_1$  值开始逐渐下降,达  $\rho_2$  值时形成一个转折,最后趋于  $\rho_3$  值(图 4-1-16(d))。

### 3. 多层断面的电测深曲线类型

由四个电性层组成的地电断面,按相邻各层电阻率之间的组合关系,其测深曲线可以有八种类型,如图 4-1-17 所示。每种类型的电测深曲线用两个字母表示。第一个字母表示断面中前三层所对应的电测深曲线类型,第二个字母表示断面中后三层所对应的电测深曲线类型。

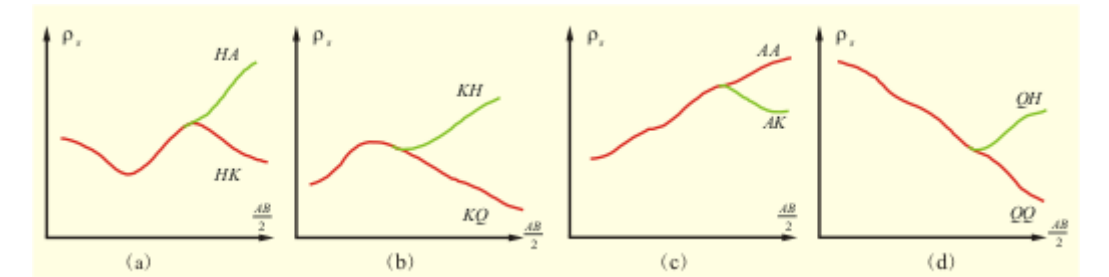


图 4-1-17 水平四层地电断面的电测深曲线

为了反映一条测线的垂向断面中视电阻率的变化情况,常需用该测线上不同测深点的全部数据绘制等视电阻率断面图。从这种图件可以看出基岩起伏、构造变化、以及电性层沿断面的分布等。其作法是:以测线为横轴,标明各测深点的位置及编号,垂直向下以  $AB/2$

为纵轴，采用对数坐标或算术坐标。依次将各测深点处各种极距的  $\rho s$  值标在图上的相应位置，然后按一定的  $\rho s$  值间隔，用内插法绘出若干条等值线。

电测深应用实例

1. 垂向电测深法确定地下花岗岩的起伏形态

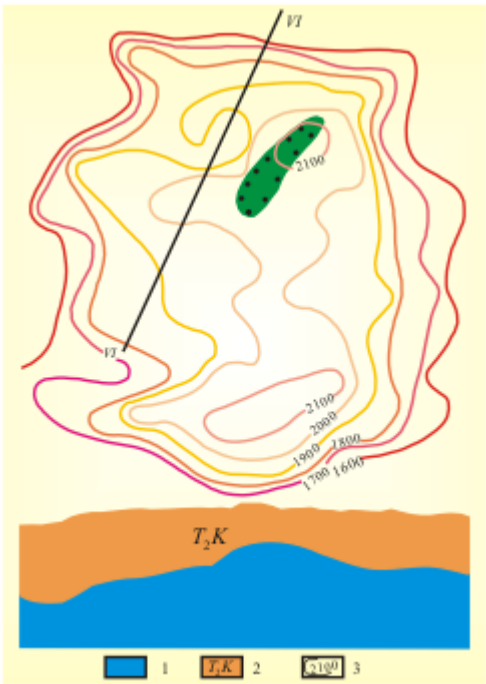


图 4-1-18 电测深法确定基岩面起伏  
1—花岗岩；2—中三叠统灰岩；3—电测深推断的花岗岩顶面高程等值线

在工作地区，燕山期花岗岩侵入三叠纪灰岩中，在花岗岩和灰岩的接触带和凹陷部位，形成了以锡为主的致密块状多金属硫化矿床，因此了解灰岩之下的花岗岩期起伏形态，对寻找矿床具有意义。如图 4-1-18，本区是以表土为  $\rho 1$  层，灰岩为  $\rho 2$  层，花岗岩为  $\rho 3$  层的 K 型 ( $\rho 1 > \rho 2 > \rho 3$ ) 的地电断面。本区地形高差在 200~400m，使电测深曲线发生畸变；表土厚度不均，使曲线脱节大与斜率上升过陡；喀斯特溶洞与不同电性的侧向影响，也是造成曲线畸变的因素。本区使用  $AB/2=2000\sim 5000m$  的供电极距，在区内发现两个较大的花岗岩突起异常。后经钻探验证为花岗岩的突起形态，平均相对误差为 12%，为进一步寻找花岗岩与灰岩接触有关的矿体提供了依据。

2. 河北某地电测深法找水

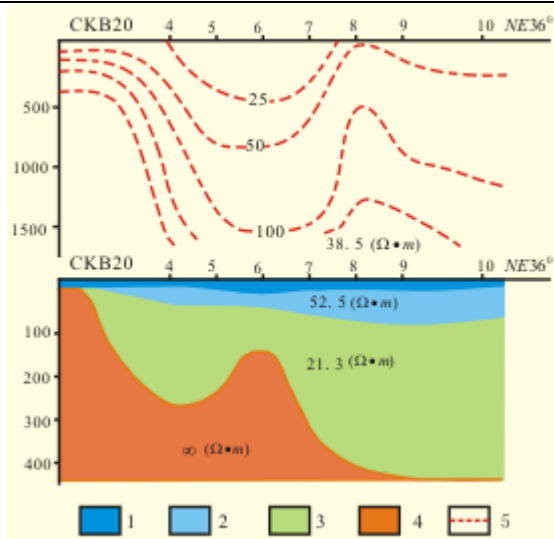


图 4-1-19 河北某地电测深法找水  
1— $\rho 1$ ；2— $\rho 2$ ；3— $\rho 3$ ；4— $\rho 4$ ；  
5—视电阻率等值线

该地位于华北平原的山前倾斜平原，使用电测深法找水，电测深曲线为 KH 型四层曲线，见图 4-1-19，从视电阻率的地电断面可以看出，含水层是自左向右（即自西向东）逐渐增大。

五、直流电测深曲线的解释

目前，对电测深曲线做定量解释的方法主要有量板解释法、数值解释法以及其他各种经验解释方法。这里重点介绍前两种方法。

### 1. 电测深曲线的量板解释法

用理论量板解释电测深曲线的原理是将绘在透明双对数坐标纸上的实际曲线与量板上参数已知的理论曲线进行形态对比，当两者重合时，根据理论曲线的参数便可以求出实际曲线对应的地电断面参数。

#### (1) 二层电测深曲线解释

由二层曲线性质可知，其曲线的形状决定于  $u_2$ ，位置决定于第一层特征点  $O_1(h_1, \rho_1)$ 。实测曲线与二层理论曲线对比解释时，应保持坐标相互平行移动，使得实测曲线与二层量板上的一条理论曲线重合得最好或均匀处于两条理论曲线之间，这时理论曲线坐标原点在实测曲线坐标里的位置即是第一电性层的特征点  $O_1(h_1, \rho_1)$ ，其纵横坐标便是第一电性层的电阻率和厚度值。另外，从理论曲线上读出  $u_2$  值，由  $u_2$  计算出  $\rho_2$  值( $\rho_2 = u_2 \rho_1$ )。图 4-1-20 为二层曲线解释实例。

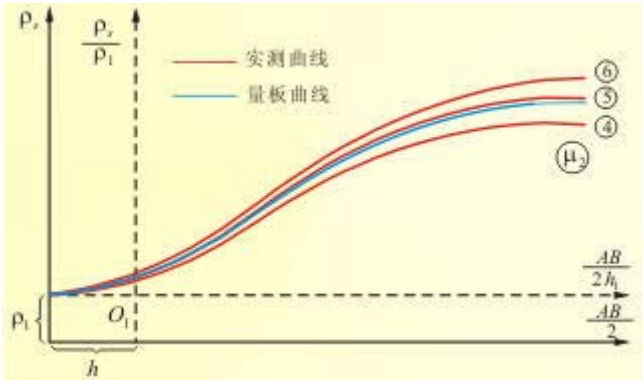


图 4-1-20 用二层量板解释二层电测深曲线

#### (2) 三层电测深曲线解释

三层电测深曲线解释可用三层量板法或辅助量板法等。现以实例的 H 型电测深曲线为例，说明用三层量板法解释曲线的方法步骤。

对已知中间层电阻率 ( $\rho_2 = 18.5 \Omega \cdot m$ 、 $\rho_3 = 750 \Omega \cdot m$ ) 的三层曲线，所求地电断面参数是  $h_1$ 、 $\rho_1$  和  $h_2$ 。

##### a) 求 $h_1$ 和 $\rho_1$

应用二层量板与实测曲线左支进行对比，纵横坐标保持相互平行移动，当二层量板中某一理论曲线右支之渐进线与已知参数  $\rho_2$  一致，且又与实测曲线左支重合得最好时，二层量板原点在实测曲线坐标里的位置即是第一电性层的特征点  $O_1(h_1, \rho_1)$  (见图 4-1-21 (a))，其纵横坐标即为  $\rho_1$  和  $h_1$  值，得  $\rho_1 = 370$ ， $h_1 = 22m$ 。

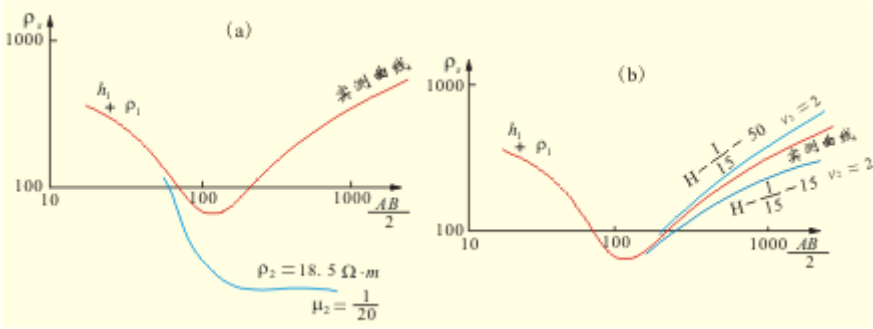


图 4-1-21 用二层量板和三层量板解释三层曲线

(a) 用二层量板解释三层曲线首支；(b) 用三层量板解释曲线尾支

b) 选择三层量板

根据已知参数  $\rho_2$ 、 $\rho_3$  和新求出的  $\rho_1$  值，计算得实际的  $u_{2s}=1/20$ 、 $u_{ss}=40.5$ 。根据实测曲线类型和  $u_{2s}$ 、 $u_{ss}$  值，查找相应的三层量板。由于在量板册中无量板 H-1/20-40.5，因此选用与之接近的两块量板：H-1/15-50 及 H-1/15-15。

c) 对比求  $h_2$  值

将实测曲线与所用的三层量板进行对比，找出与之重合的最好的理论曲线，记下其  $v_2L$  值，由  $v_2L$  值求出  $h_2$ 。若选用的量板  $u_2L$  值与实测曲线的  $u_2S$  相同，则前述的  $v_2L$  量板  $v_2S$  值便应为实测曲线的  $v_2S$  值；若选用的  $u_2L$  与  $u_2S$  不一致，则应进行等值运算求出  $h_2$  值。

如图 4-1-21 (b) 所示对比结果，实测曲线与量板中  $v_2L=2$  的理论曲线重合的较好，进行等值运算得

$$h_2 = \frac{\mu_2^S}{\mu_2^L} \bullet v_2^L \bullet h_1 = \frac{1}{\frac{20}{1}} \times 2 \times 22 = 33 \text{ m}$$

于是基底深度为  $H = h_1 + h_2 = 22 + 33 = 55\text{m}$

(3) 多层电测深曲线解释

对于四层或四层以上的多层电测深曲线，定量解释都是在二层或三层曲线定量解释的基础上进行。例如在对一条四层曲线进行解释时，往往只先考虑前三层，并且完全按照一条三层断面进行解释。当求出  $h_1$ 、 $h_2$ ，并已知  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  时，可用辅助量板求出与第一、第二层等价的某一代替层的厚度  $h_{1,2}$  及电阻率  $\rho_{1,2}$ 。最后把一、二层看作是一层，而把曲线右支同样认为是三层进行解释。多层曲线的解释和四层曲线的解释方法完全一致，可以化为  $n-2$  ( $n$  为层数) 个三层曲线依次进行解释。