

电阻率法解释中的近似组合规则及应用实例

葛为中

引言

电阻率法野外测定结果可用视电阻率空间表示,即用视电阻率等值线断面图表示。工作时,在地面的一条测线上布置一系列测深点。测深点在线上的水平位置由 x 坐标确定。将每个测深点测得不同极距 (a) 的观测值 $\rho(x, a)$ 分别标在相应测深点下方“深度”为 a 处的点上。勾绘等值线即构成所观测的视电阻率空间断面图,图中等值线的形态能反映实际空间的真电阻率分布情况,甚至可用来进行定量解释。本文只讨论二度体问题。

实际空间的真电阻率可用 $\rho(x, z)$ 表示,这里坐标的 Z 方向与视电阻率空间中 a 的方向一致,都垂直向下。在真电阻率空间内存在明显的介质分界面,电阻率有突变(如断层或接触面)。而在它的视电阻率空间里,异常则是连续的。仅在介质分界面出露情况的观察面上才具有特殊性,该处的视电阻率出现局部不连续。视电阻率的连续性和特殊性在一定程度上则取决于所用的电极装置。

1967年G.M.哈伯杰姆提出采用正方形排列的电极装置来观测,正方形排列的四个电极(一对供电极、一对测量极),位于正

方形四个角上(见图1中1、2、3、4)。正方形的边长 a 作为极距长度,正方形的中心点作为电测深的中心点位。

人们熟悉的电极装置是直线排列的,供电极和测量极都在同一条直线上。这种直线排列的方向与地质体走向之间的方位变化,直接影响视电阻率的观测结果。然而,正方形排列对方位的变化,是不灵敏的。如果使正方形的一条对角线与地质体走向的夹角 θ 保持不变,则所测得空间断面将是唯一的。

在电阻率法中,水平层状介质、出露的直立分界面、出露的倾斜分界面和出露的直立岩层等几种基本解已经推导出来。第一种解的视电阻率等值线平行于水平地表观测面,现在它已有了用电子计算机的自动解释法。后几种解的视电阻率等值线均不平行于水面,也有了一些定量的解释方法。然而,由于实际问题一般都很复杂,解析解的实用价值有限。哈伯杰姆于1974年提出两条组合规则。利用这两条规则,就可从基本的解析的解出发,加以适当组合,近似地解决各种各样复杂的二度体问题。这些规则都比较简单,由于没有考虑各界面间的相互作用,故带有明显的近似性。作者还详细地讨论了规则应用的近似程度,并在实际中应用了这种组合规则。

组合规则

将已知基本解的两个真实空间,通过简单的数学运算将二者组合起来,成为所需的复杂空间模型。而这两个组成空间中的已知视电阻率值也就用同样的数学运算规则结合起来,获得组合复杂的视电阻率空间(一级近似地)。此外,组合还可以连续进行,从而得到更复杂的组合空间。

组合规则有两条:两个组成空间的界面如果在组合过程中在观测面以下不相交,用规则(1);如果相交,则用规则(2)。

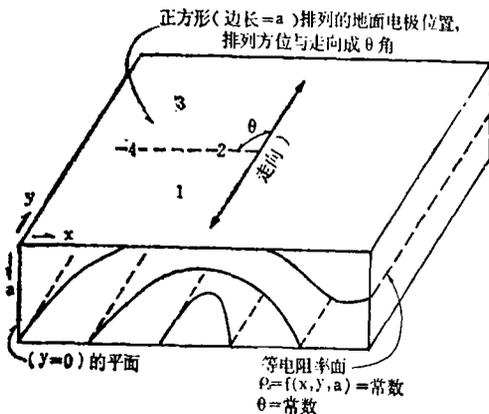


图 1

规则1 两个直立分界面组合起来,便得到一个出露的岩脉。

在图2a (I) 直立分界面空间的真电阻率为 $\rho(x, z)_1$, 已知

$$\rho(x, z)_1 = \begin{cases} \rho_1 & \text{当 } x < x_1 \\ \rho_2 & \text{当 } x > x_2 \end{cases}$$

将真电阻率除以 ρ_1 , 换算成无量纲形式:

$$\frac{\rho(x, z)_1}{\rho_1} = \begin{cases} 1 & \text{当 } x < x_1 \\ \rho_2/\rho_1 & \text{当 } x > x_2 \end{cases}$$

同样在图2a (II) 空间除 ρ_2 , 得

$$\frac{\rho(x, z)_2}{\rho_2} = \begin{cases} 1 & \text{当 } x < x_2 \\ \rho_3/\rho_2 & \text{当 } x > x_2 \end{cases}$$

使两个(无量纲)空间相乘, 得到组合空间的无量纲形式 $\rho(x, z)$,

$$\rho(x, z) = \frac{\rho(x, z)_1}{\rho_1} \times \frac{\rho(x, z)_2}{\rho_2}$$

$$= \begin{cases} 1 & \text{当 } x < x_1 \\ \rho_2/\rho_1 & \text{当 } x_1 < x < x_2 \\ \rho_3/\rho_1 & \text{当 } x > x_2 \end{cases}$$

最后, 以 ρ_1 与 $\rho(x, z)$ 相乘, 就变成组合电阻率空间 $\rho(x, z)_c$, 即

$$\rho(x, z)_c = \rho_1 \times \rho(x, z)$$

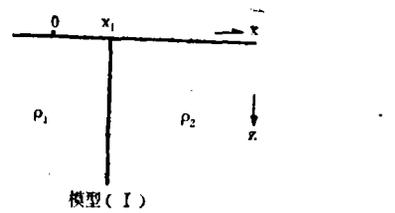
$$= \rho_1 \left[\frac{\rho(x, z)_1}{\rho_1} \right.$$

$$\left. \times \frac{\rho(x, z)_2}{\rho_2} \right]$$

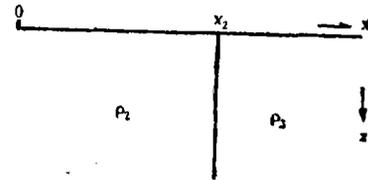
$$= \begin{cases} \rho_1 & \text{当 } x < x_1 \\ \rho_2 & \text{当 } x_1 < x < x_2 \\ \rho_3 & \text{当 } x > x_2 \end{cases}$$

它就是岩脉的真电阻率空间[图2a (III)]。

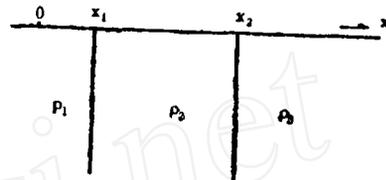
只要测量装置的方位保持不变, 而且真实的地下情况属于二维的, 则图2a (I) 的真空间 $\rho(x, z)_1$ 所给出的视电阻率空间 $\rho(x, a)_1$ 将如图2b (I) 所示, 由一组会聚在 x_1 点的放射状等值线组成, 其值由 $a=0$, $x < x_1$ 的 ρ_1 变为 $a=0$, $x > x_1$ 的 ρ_2 (在用正方形电极排列时, 这种变化是一种单调的变化)。对于图2b (II) 同样有类似的空间 $\rho(x, z)_2$, 视电阻率变化在 ρ_2 与 ρ_3 之间, 放射状等值线会聚在 x_2 点。组合空间 $\rho(x, a)_c$ 利用真实空间的规则则为 $\rho_1 \cdot \rho(x, a)$



模型(I)

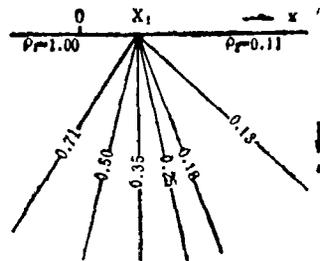


模型(II)

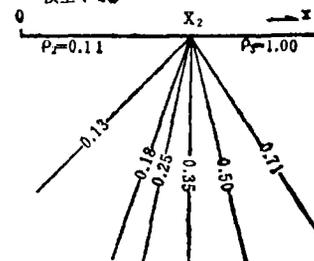


组合模型(III)

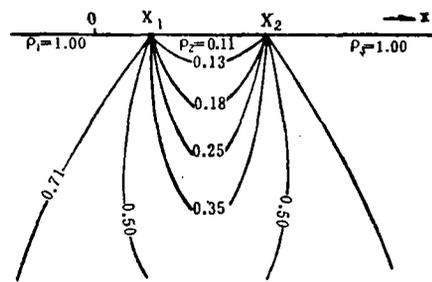
图 2a



模型(I)



模型(II)



组合模型(III)

图 2b

$= \rho_1 \left[\frac{\rho(x, a)_1}{\rho_1} \times \frac{\rho(x, a)_2}{\rho_2} \right]$, 组合模型见图2b(Ⅲ), 图中假设: $\rho_1 = \rho_3 = 1.00$, $\rho_2 = 0.11$.

在空间表面 $a = 0$ 时的边界条件是: 在 $a = 0$ 的极限情况下 (靠近 x_1 或 x_2 分界面附近的情况除外), 组合视电阻率空间 $\rho(x, a)_c$ 的值与 $z = 0$ 时的 $\rho(x, z)_c$ 的对应值相等, 即 $a = 0$,

$$\begin{aligned} \rho(x, a)_c &= \rho_1 \quad \text{当 } x < x_1 \\ &= \rho_2 \quad \text{当 } x_1 < x < x_2 \\ &= \rho_3 \quad \text{当 } x > x_3 \end{aligned}$$

如果 a 很小, 即 $a \ll (x - x_1)$, 则组合视电阻率空间 $\rho(x, a)_c$ 当其在 $x = x_1$ 附近, 应近似地与模型 (I) 视电阻率空间一样, 在 $x = x_2$ 附近, 应近似地与模型 (II) 视电阻率空间一样. 即在 a 小, $x < (x_1 + a)$ 时,

$$\rho(x, a)_c = \rho_1 \left[\frac{\rho(x, a)_1}{\rho_1} \times \frac{\rho_2}{\rho_2} \right] = \rho(x, a)_1, \quad \text{而在 } x > (x_2 - a) \text{ 时, } \rho(x, a)_c = \rho(x, a)_2.$$

如果 $a \gg (x_2 - x_1)$, 在此极限时, 组合视电阻率空间 $\rho(x, a)_c$ 将和位于 $(x_1 + x_2)/2$ 处的一个直立分界面 (两侧介质的电阻率分别为 ρ_1 和 ρ_2) 的视电阻率空间一样. 根据规则 I, 由 $(x_1 + x_2)/2$ 区域有一组放射状等值线放射出, 可以证明, 视电阻率值的分布, 在 ρ_1 到 ρ_3 的范围内与所要求的视电阻率并不一致. 说明规则 I 只是近似地正确.

规则 1 的应用范围还可以扩大, 可用于任意数量的平行直立界面 (或倾斜界面). 须知求这类空间的解析解是非常困难的.

规则 2 由水平界面空间和直立界面空间组合成隐伏的直立界面空间.

真实空间的组合过程见图3. 图最上面(a)是已知水平界面真实空间 $\rho(x, z)_H$, (b)是直立界面真实空间 $\rho(x, z)_V$, (c)是要求组合的空间, 组合步骤如下:

①将两已知真实空间分别除以 ρ_1 , 变成无量纲的规一化空间.

②两规一化空间分别减去 1.

③分别乘上公因子 $\rho_1 / (\rho_2 - \rho_1)$, 得到两个规格化空间:

对于模型 (a)

$$\frac{\rho(x, z)_1 - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} = \begin{cases} 0 & \text{当 } z < z_1 \text{ 时} \\ 1 & \text{当 } z > z_1 \text{ 时} \end{cases}$$

对于模型 (b)

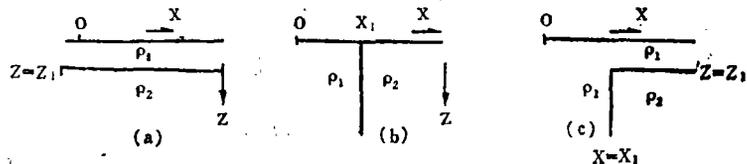
$$\frac{\rho(x, z)_2 - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} = \begin{cases} 0 & \text{当 } x < x_1 \text{ 时} \\ 1 & \text{当 } x > x_1 \text{ 时} \end{cases}$$

④再将两空间彼此相乘, 得到 $P(x, z)$,

$$P(x, z)_c = \left\{ \frac{\rho(x, z)_H - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} \right\} \times \left\{ \frac{\rho(x, z)_V - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} \right\}$$

⑤最后按以上①、②、③相反顺序进行逆运算, 恢复组合的真实电阻率空间 $\rho(x, z)_c$,

$$\begin{aligned} \rho(x, z)_c &= \left\{ P(x, z) \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} + 1 \right\} \rho_1 \\ &= P(x, z) \cdot (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1 \\ &= \begin{cases} \rho_1 & \text{当 } P(x, z) = 0 \text{ 时} \\ \rho_2 & \text{当 } P(x, z) = 1 \text{ 时} \end{cases} \end{aligned}$$



由(a)和(b)组合成(c)按以下顺序运算进行组合:

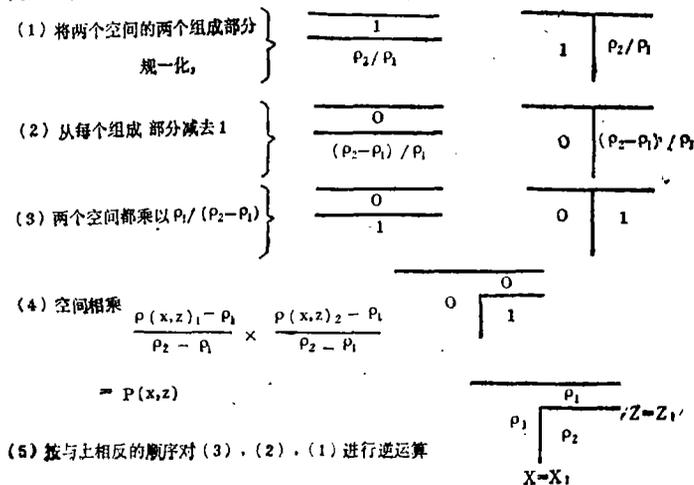


图 3

以上真实空间的运算也可用于电阻率空间。模型(a)和(b)上的视电阻率值分别为 $\rho(x,a)_H$ 和 $\rho(x,a)_V$ (电极装置和其方位保持不变, y座标固定)。利用相同的运算, $P(x,a)_c$ 可以写成

$$P(x,a)_c = \frac{\rho(x,a)_H - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} \times \frac{\rho(x,a)_V - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1}$$

所得组合模型(c)的视电阻率为

$$\rho(x,a)_c = P(x,a)_c \cdot (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1 = \frac{[\rho(x,a)_H - \rho_1] \cdot [\rho(x,a)_V - \rho_1]}{\rho_2 - \rho_1} + \rho_1$$

对于组合模型(c)而言, 应用规则2, 在空间表面 $a=0$ 时的边界条件必须是等于 ρ_1 , 因为 $\rho(x,a)_H = \rho_1$, 在 $a=0$ 时, $\rho(x,0)_c = \rho_1$ 。

当 $x = -\infty$ 时: 离开直立界面很远 $\rho(x,a)_c$ 应等于 ρ_1 。利用规则2, 因 $\rho(x,a)_V = \rho_1$, 所以当 $x = -\infty$ 时, $\rho(x,a)_c = \rho_1$ 。

当 $x = +\infty$ 时: 这时 $\rho(x,a)_c$ 必须等于 $\rho(x,a)_H$, 根据规则2, 则 $\rho(x,a)_V = \rho_2$ 。

当 $a = \infty$ 时, 在此限度范围内 $\rho(x,a)_H = \rho_2$, 于是 $\rho(x,a)_c = \rho(x,a)_V$ 。

上述边界条件对隐伏的垂直断层都能满足, 不过这些条件对所提出的组合规则的真实性在组合空间也不是处处都是充分的, 利

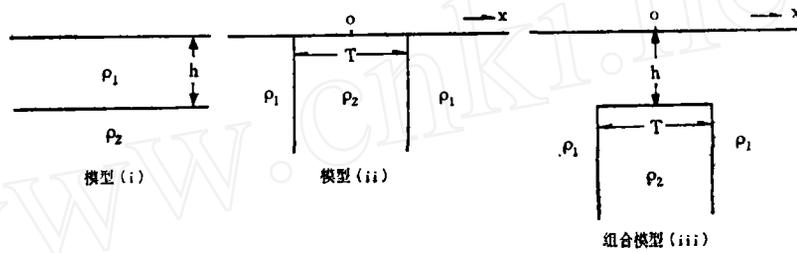


图 4

用模型实验就可以知道了。

还可以列举一些可用规则2组合的例子。例如, 将两层水平介质与出露的直立岩脉组合成隐伏的岩脉模型(图4), 或者将三层水平介质与出露的直立岩脉组合成二度的“断块”模型(图5a)。图5b是水槽模型实验结果, 电阻率参数取 $\rho_2 = 3.2\rho_1$, $\theta = \frac{\pi}{4}$ 。从图可以看出, 组合空间的等值线与实测的等值线在形态上很接近, 说明虽有误差, 但不算太大。

规则1和规则2还可接连使用来解决更复杂的问题。图6是一个复杂的倾斜断层的例子。由图中(1)的A和B组合成P, 由图中(2)的C和D组合成Q, 最后由P和Q组合成复杂断层R(3)。

应用实例

下面是应用组合规则, 对英格兰德比那萤石矿床的电阻率法资料, 进行推断解的一个实例。

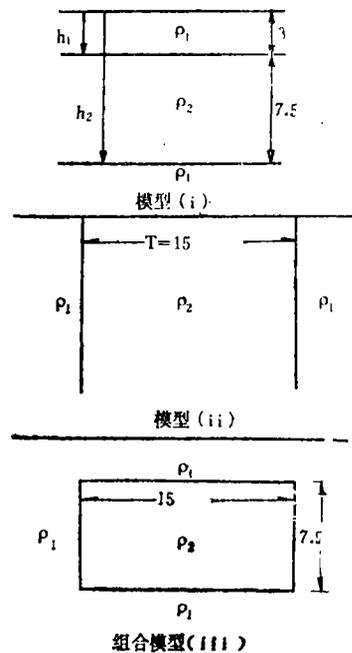


图 5 a
(单位: 厘米)

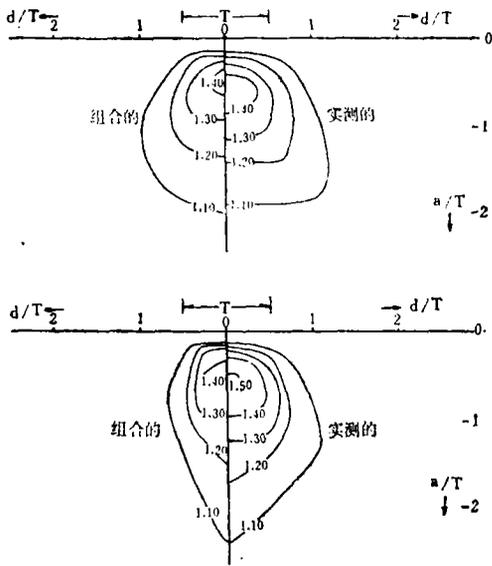


图 5b

此地区有大片灰岩及火山岩，背斜构造的走向已经查明。在电阻率法获得的低阻异常上，经工程揭露发现有经济价值的萤石矿脉。在勘探阶段又在一条剖面上布置了一系列正方形电极排列的电测深工作，在每一测深点上测得十二个不同极距的视电阻率值，正方形的某条对角线始终平行于矿脉走向，

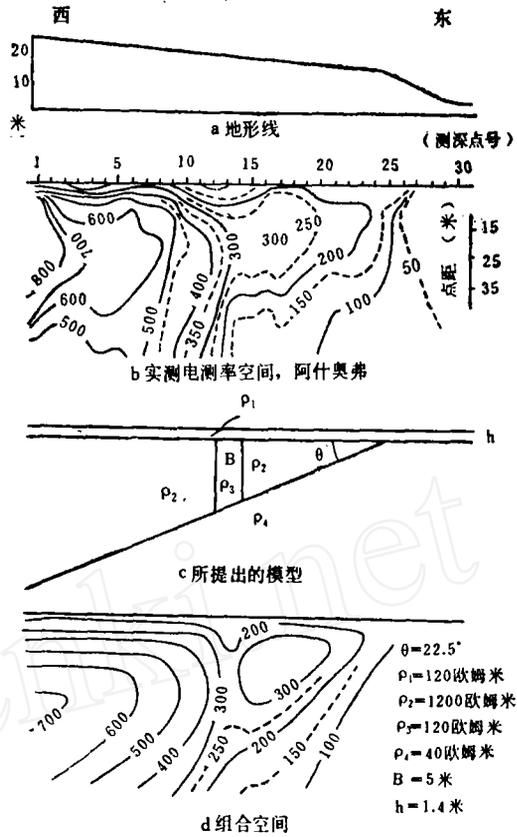


图 7

方位 θ 固定，正方形边长 a 由1.4米逐步增大到64米。

剖面的地形变化见图7a，与矿脉呈正交的视电阻率空间断面图见图7b，在此剖面上共有30个测深点，点距一般为5米，剖面西端的点距加大到10米。根据测深点位置 x 和所用极距 a ，标上所测得的电阻率值，勾绘出等值线，形成观测的视电阻率空间，异常特征是：

(1) 在26号点和28号点之间等值线发生会聚，反映了高、低阻区域的倾斜界面。

(2) 高阻区内用小极距测得的电阻率都较低，说明地表覆有一低阻的覆盖层。14号点附近电阻率降低。

(3) 倾斜界面一侧的低阻等值线向高阻区域下方倾没。在12~16号点下方等值线局部向上拱起，150、200和250欧姆米三条等值

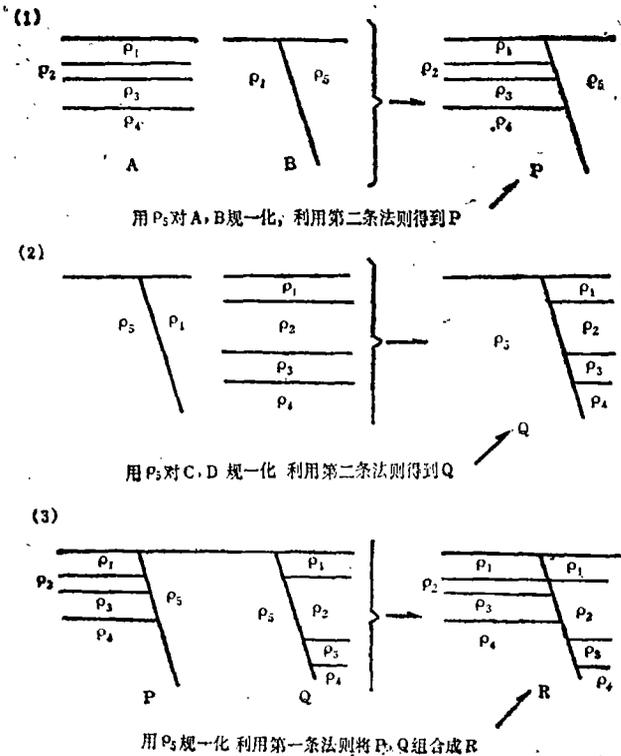


图 6

线拱起得比较明显。推断在此范围内可能存在着隔开两个高阻体的良导性岩脉。

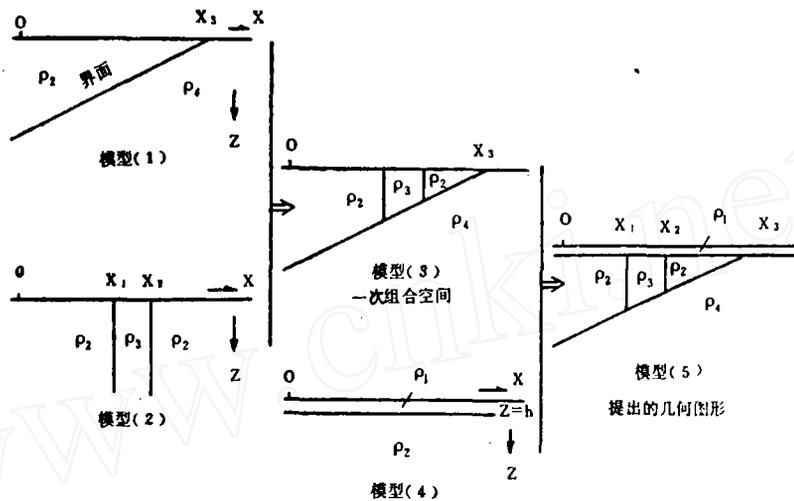
根据上述特征提出如图7c的组合模型。设地面有电阻率为 ρ_1 的均匀覆盖层。根据1~5号点范围内用小极距测得的资料,利用两层电测深解释法求得 ρ_1 为120欧姆米, ρ_2 为1200欧姆米,覆盖层厚度 h 为1.4米。根据17~30号点用大极距测得的资料应用倾斜界面的定量解释法,求得倾角 $\theta = \pi/8$, $\rho_4 =$

40欧姆米。

在应用组合规则的同时,并考虑上述参数值,以及矿脉的电阻率 ρ_3 和宽度 P 的尝试值,可计算出所提出模型的视电阻率空间,再与实测空间相比。最后得到的组合空间和拟合的参数值示于图7d。

先由图8中模型(1)和模型(2)组合成模型(3),组合步骤如下:

I. 两模型空间均除以 ρ_4 使之规一化,



阿什奥弗的实例,实际空间组合示意图

图8

再将两规一化空间分别减1,然后使二者分别乘以 $\rho_4 / (\rho_2 - \rho_4)$,则模型1变为 $[\rho(x, z)_2 - \rho_4] / (\rho_2 - \rho_4)$ 。现在模型I中包含了大小为1和0的区域。

II. 使上面两个规格化空间相乘,其乘积为

$$P(x, z) = [\rho(x, z)_1 - \rho_4] \cdot [\rho(x, z)_2 - \rho_4] / (\rho_2 - \rho_4)^2$$

III. 按上述相反顺序进行逆运算,则得到组合的真实电阻率空间,即对 $P(x, z)$ 空间乘 $(\rho_2 - \rho_4) / \rho_4$ 加1再乘 ρ_4 ,得

$$\rho(x, z) = \frac{[\rho(x, z)_1 - \rho_4][\rho(x, z)_2 - \rho_4]}{\rho_2 - \rho_4} + \rho_4$$

要想获得图7c所提出的模型,则将上面组合的模型3与模型4(图8)再组合起来。运算步骤包括: I. (a)除以 ρ_1 , (b)减1(c)乘以 $\rho_1 / (\rho_2 - \rho_1)$; II. 相乘组合; III. 作相

反运算。最后获得模型(5)的组合空间 $\rho(x, z)_c$ 。

$$\rho(x, z)_c = \frac{[\rho(x, z)_3 - \rho_1][\rho(x, z)_4 - \rho_1]}{\rho_2 - \rho_1} + \rho_1$$

对比实测等值线图(图7b)和组合空间等值线图(图7d),可以看出二者的形状和大小都相似。根据分布在两个空间某些记录整齐的点上的数值的对比,均方误差为6.2%,说明所求数据是比较吻合的。小极距的视电阻率值有些差异,这是由于覆盖层的电性和厚度有变化所引起,其中还可能包括地形影响。此外还可能有组合过程的局部误差。

推断的 ρ_2 、 ρ_4 和 θ 都比较正确, ρ_1 和 h 近似于平均估计值,而 ρ_3 和 b 只是“理想的”矿脉参数,其中包含了多解性,而且在实测资料中无法确定矿脉是否延伸到基岩。

组合解释的结果与地质剖面很吻合。剖

面西端的含碳灰岩向西倾没，倾角 10° ，东端有玄武斑岩（基岩）出露，界线与推断的一致。后来探槽揭露结果，证实所推断的矿脉位置和厚度是正确的。

鉴于组合规则是近似的，为考察其近似程度，进行了模型实验。用石墨混凝土作模型，放于盐水中，电极装置及其方位与野外情况相同。水槽中观测得的视电阻率空间断面以及模型参数均示于图9。实验中所采用的电阻率 ρ_1 、 ρ_2 和 ρ_3 是相等的，与实际情况有出入，但在模型实验测得的断面图中等值线的形态与野外观测的断面以及组合的视电阻率空间基本上相似。与用规则2计算的组合视电阻率空间（计算时，取 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3$ ）对比，均方误差为15%。

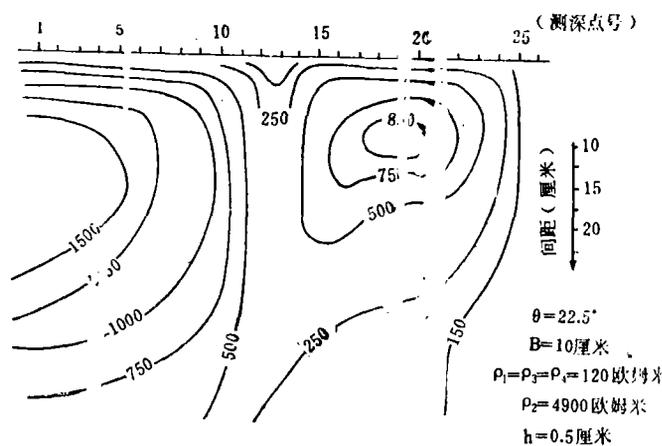
结 论

应用本文介绍的组合规则，能使某些比较复杂的地电断面的推断解释，大为简化。组合规则近似计算各种二度模型的视电阻率值，是从有已知解的简单模型出发的。所得

的解虽然可能有很多，但在有地质解释配合，参数范围有控制的前提下，是能够得到近于实际情况的推断结果的。

我们认为，组合规则只是电阻率法成果解释方法的一种。早在1964年苏联的布洛赫就提出过用乘积公式组合复杂地电断面的方法，与所介绍的组合方法类似。我国在地形改正方绍面用组合叠加方法，也获得较好的效果。不过哈伯杰姆所提出的规则，能解决较多较复杂的问题，值得在有条件的地区试用。哈伯杰姆所使用的电极装置是正方形排列，我国物探工作者还不悉当，当然，普查扫面用这种排列太麻烦，用于精测剖面还是可行的。而且组合规则本身并不受电极排列的限制，成果表示方式也受限制，所以，组合规则对用常规电极排列测得的剖面曲线或等视电阻率断面图的推断解释。均有参考价值。

组合规则还有待改进，要进一步提高其近似程度。要与用数值解法（有限元法、有限差分法）的理论结果或电阻网络等模型实



水槽模拟的空间

图9

验结果对比，深作人的研究。推广到应用于激发极化法，估计也是可能的。同时组合规则也不限于这两条。为提高复杂地电断面的

定性、半定量或定量解释水平 还应该探索更好的组或定法。