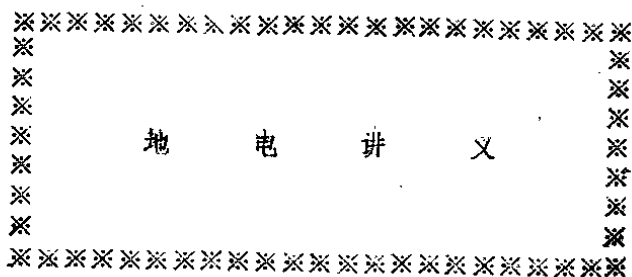


地电讲之

水士编

1872



地 电 讲 义

北京大学地球物理系

一九七二年十月

第一章 电阻率法预报地震

第一节：电阻率法的原理

一、均匀各向同性介质中点源的电场。

(1)点源在均匀各向同性全空间中的电场。

(2)点源在均匀各向同性半空间中的电场。

二、均匀各向同性介质电阻率的测定。

三、视电阻率的概念。

四、电流密度随深度的变化（勘探深度的概念）。

五、电测深法简介。

六、二层剖面的电测深理论曲线及其使用办法。

第二节：仪器

一、测量地面上电位差的方法。

(1)补偿测量法。

(2)非补偿测量法。

二、电子自动补偿仪。

(1)自动补偿线路的原理。

(2)电子自动补偿仪的原理

(3)DDG—2 A型电子自动补偿仪的主要技术特性。

(4)使用方法。

三、漏电及其他因素的干扰。

第三节：作为预报地震的前兆手段。

一、影响岩石电阻率的因素。

(1)岩石和矿物电阻率与其矿物成分及组成结构的关系。

(2)与所含水溶液的关系。

(3)与温度的关系。

(4)与压力的关系。

二、预报地震的效果。

第二章 大地电场和自然电场

第一节。大地电场和自然电场的各种现象

一、大地电场的表示法。

二、大地电场的日变化

三、短周期变化（电磁脉动）

四、大地电流的缓慢变化。

五、自然电场。

六、工业游散电流。

第二节：观测装置。

一、地电场的记录装置。

二、电极极化电位的稳定性问题和不极化电极

第三节：预报方法

一、用自然电场法预报地震。

二、大地电场和地震预报

第三章 大地电磁法

第一节：大地电磁法的理论基础。

一、马克斯威尔方程组。

二、垂直入射的平面电磁波在水平均匀层状介质中的表示式。

三、输入阻抗

四、视电阻率 ρ_T

五、大地电磁测深理论曲线简介。

六、穿透深度。

※七、测场不均对大地电磁测深的影响

第二节：大地电磁脉动的观测仪器。

一、观测磁脉动的仪器。

(1)光电效应、光电管、光电倍增管。

(2)采用强负反馈线圈的磁脉动仪原理。

(3)光电倍增管桥式放大器

二、观测电脉动的仪器。

第三节：在地震预报中的用处。

第一章 电阻率法预报地震

第一节 电阻率法的原理

一、均匀各向同性介质中点源的电场。

(1) 点源在均匀各向同性全空间中的电场

由于点源周围的介质是均匀各向同性的，所以电流线自点源呈辐射状分布。距点源 r 处的 M 点的电流密度 j 应为：

$$j = \frac{I}{4\pi r^2}$$

I 为点源供电电流强度。考虑到 $j = \sigma E = \frac{1}{\rho} E$ ，以及

$E = -\frac{dv}{dr}$ ，就可得：

$$dv = -\frac{I\rho}{4\pi} \cdot \frac{dr}{r^2}$$

其中 v 代表电位， E 为电场强度， σ 为导电率， ρ 为电阻率。

积分后的 M 点的电位，

$$v = \frac{I \cdot \rho}{4\pi r}$$

(2) 点源在均匀各向同性半空间中的电场。

以上讨论的是全空间的电场，而实际工作都是在地面上进行的，这时地面为地下介质和空气的分界面。如果近似地

把地面当作无限平面，则在地下半空间中任意一点电场的电位满足拉普拉斯方程。在无限处电位应为零，在地面上由于空气的电阻率为无穷大，所以地下电不能流入空气中，地面上各点电流密度的垂直分量应为零。

$$j_n = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial v}{\partial n} = 0$$

数理方程讲义已解过这个问题，这里只是复习一下。为满足上述边条件，可以用镜象法求解。如果讨论的问题如图1所示，点源 I 位于地下电阻率为 ρ 的导电介质中，并与地面相距为 h 。用镜象法求解时，可设一虚电源 I' ($I' = I$) 和 I 对称地位于分界面另一边，而设全空间均为同一介质。

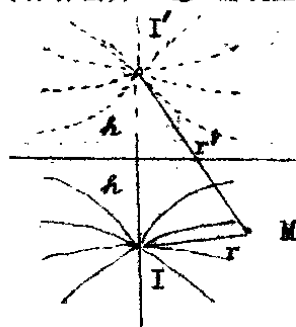


图1. 点电源在地下半空间供电的电场分布

M 点的电位为点源 I 和 I' 所产生的和，

$$\begin{aligned} V &= V_I + V_{I'} = \frac{I\rho}{4\pi r} + \frac{I'\rho}{4\pi r'} \\ &= \frac{I\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \end{aligned}$$

实际工作时 I 位于地表，即 $\lambda = 0$ ，这时 $r = r'$ ，

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r}$$

结论是：当有地面存在时，导电半空间中电位等于全空间充满同一导电介质时的电位的两倍。

二、均匀各向同性介质电阻率的测量

在地面上用两个点极 A 和 B 供直流电。在另外任意两个点电极 M、N 间测量 A B 电源产生的电位差，如图 2 所示，AM、BM、AN、BN 代表距离。

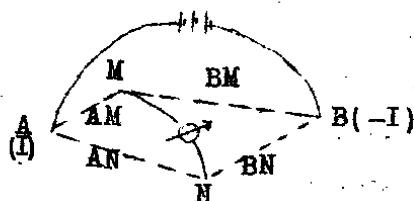


图 2，四极装置测电阻率

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{AM} + \frac{-I\rho}{2\pi} \frac{1}{BM}$$

$$= \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right)$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{AN} + \frac{-I\rho}{2\pi} \frac{1}{BN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$$

因此，M、N 间的电位差为：

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I} = K \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I}$$

其中 $K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$

称为装置系数。当各电极位置一定时，K为常数。

由公式 $\rho = K \frac{\Delta V_{MN}}{I}$ 可见，当我们由A B向地下供入电流I时，便可通过测定M、N极间的电位差 ΔV_{MN} 获得导电介质的电阻率值。

如果AMNB四极在一条直线上，并且对称地如图3。那样分布时，即 $AM = BN$

$AN = BM$ ，则公式可简化为

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



图3 四极对称装置

三、视电阻率的概念

公式 $\rho = K \frac{\Delta V}{I}$ 是在均匀各向同性的介质的情况下求得的。但在自然界中通常是不均匀介质。如果在不均匀介质情况下按上述装置进行同样的测量，则由上述公式计算的 ρ 值，便不是介质电阻率的真值，而称为视电阻率，并用字母 ρ_k 表示。实际上视电阻率，是在电流场作用范围内各种岩石电阻率的综合反映，它既不等于这种岩石的电阻率，又不等于那种岩

石的电阻率。在均匀各向同性介质中进行测量时，不管A、B、M、N之间的距离如何。按公式 $\rho = K \frac{\Delta V}{I}$ 所求得 ρ 值都将保持一样。而 ρ_K 的大小在本质上既决定于AB、MN之间的距离，又决定于它和介质中某些不均匀体的相对位置，同时还和地质体的体积大小、埋藏深度、或地层厚度、深度有关。因此研究 ρ_K 随着电极距的改变，或者电极距离地质体的相对位置的改变而出现的变化规律，我们就能判断地下地质构造的性质。在地震前兆观测中，我们用固定不变的电极装置，测量电流场作用范围内某些（或全部）地层电阻率的变化。

另外，由 $\rho_K = K \frac{\Delta V}{I}$ 可知， ρ_K 与通入地下的电流强度I无关，因为I的改变将引起电位差 ΔV 成正比的改变，结果 $\frac{\Delta V}{I}$ 这个比值仍不变。

四、电流密度随深度的变化（勘探深度的概念）

电流密度随深度变化的性质。对于电阻率法来说，具有很大的意义。实际上，地面电法只能根据地表电流密度的变化（即 ΔV_{MN} 的变化）来判断地下不均匀地质体的存在或其电阻率的变化。这是由于地表处的 $E = \rho j$ ，而 $E = -\frac{\Delta V_{MN}}{MN}$ ，所以

$$|\Delta V_{MN}| = j_{\text{地表}} \rho_{\text{地表}} MN$$

当MN， $\rho_{\text{地表}}$ 都不变时， $j_{\text{地表}}$ 的变化就决定了 ΔV_{MN} 的变化。所以，如果电流场作用范围内某些地方的电阻率变化了（为使讨论的问题简单些，假设 $\rho_{\text{地表}}$ 不变），电流密度的

分布就要改变，因此必然影响到地表MN电极处的J。导致 ρ_k 的变化。

集中于地表的电流越多，即电流密度越大，流入深处的电流就越少。而当埋于深处的岩石中电流密度很小时，这些岩石电阻率的改变对地表附近电流密度的改变影响不大，用物探的术语说就是勘探深度也越小。

下面讨论一下在均匀各向同性半空间中电流分布性质。

(1) 一个点电极。

从电极A (图4) 流入

地下的电流为I，在与A相距 r_M 点上的电流密度：

$$j_0^A = \frac{I}{2\pi r_M^2}$$

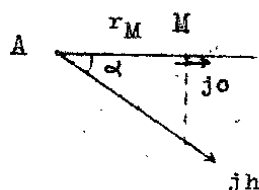


图 4

在M点下面 h 深处的电流密度：

$$\begin{aligned} j_h^A &= \frac{I}{2\pi(r_M^2 + h^2)} = \frac{I}{2\pi r_M^2} \cdot \frac{j_0^A}{1 + \tan^2 \alpha} \\ &= \frac{j_0^A}{1 + \tan^2 \alpha} = j_0^A \cos^2 \alpha \quad \dots\dots\dots(4.1) \end{aligned}$$

当 $h = r_M$ 时，很容易看出 $\alpha = 45^\circ$ ，这时

$$j_h^A = \left(\frac{1}{2} \right)^2 j_o^A = \frac{1}{2} j_o^A \dots\dots\dots (4.2)$$

至于 j_h^A 的水平分量应为 $j_h^A \cos 45^\circ$

$$= \frac{1}{2\sqrt{2}} j_o^A = \frac{1}{3} j_o^A$$

(2) 两个点电极

有两个点电源时，地表附近的电流密度 j_o^{AB} 和 A、B 电极中间“O”点以下 h 深处的电流密度 j_h^{AB} (图5) 可计算如下：

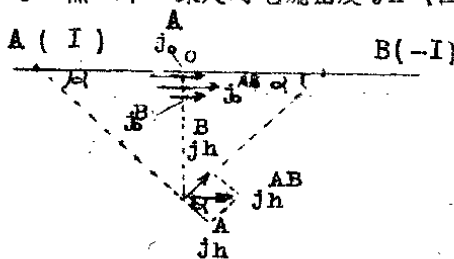


图 5

$$j_o^{AB} = j_o^A + j_o^B = 2j_o^A$$

$$j_h^{AB} = j_h^A + j_h^B = 2j_h^A \cos \alpha = 2 \left(\frac{1}{2} j_o^A \cos^2 \alpha \right) \cos \alpha$$

$$= j_o^A \cos^3 \alpha \dots\dots\dots (4.3)$$

当 $h = AO$ 时， $\alpha = 45^\circ$ ，则

$$j_h^{AB} = j_o^{AB} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^3 = \frac{1}{2.82} j_o^{AB} = \frac{1}{3} j_o^{AB} \dots\dots (4.4)$$

比较公式 (4.2) 与 (4.4)，可以得出结论：电

流密度在两个点电极间比在单个点电极附近随深度减小得更快。这是由于在两个电极的情况下， j_h^A 与 j_h^B 的垂向分量互相抵消的缘故。但是两种情况下电流密度的水平分量减小的速度一样。

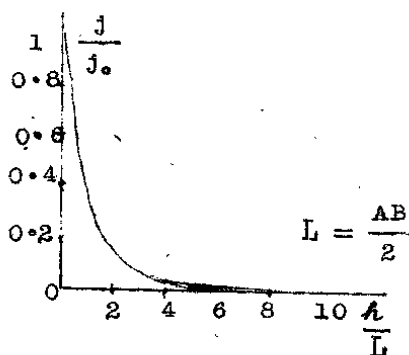


图 6

$$\text{设 } L = \frac{AB}{2},$$

$$j_h^{AB} = j_0^{AB} \cos^3 \alpha = j_0^{AB} \left(\frac{L}{\sqrt{L^2 + h^2}} \right)^3$$

$$= j_0^A \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{L} \right)^2}} \right)^3$$

$$\therefore \frac{j_h^{AB}}{j_0^{AB}} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right)^{3/2}}$$

图6上画出了 $\frac{j_h^{AB}}{j_0^{AB}}$ 和 $\frac{h}{L}$ 的关系曲线。

在深度 $h = \frac{AB}{2}$ 时， $j_h = 0.36 j_0$ 。

$A = AB$ 时, $j_h = 0.1 j_0$.

$A = 3AB$ 时, $j_h \rightarrow 0$

结论: 电流密度随深度的分布决定于供电电极的距离。

通常电流密度比值 $\frac{j}{j_0}$ 要达到一定数值时方能影响地表的电场。可见, 要加大勘探深度 h 只有加大 L 方能办到。

有的书上就以 $\frac{j}{j_0} = \frac{1}{3}$ 的深度 $h = \frac{AB}{2}$ 作为勘探深度。

勘探深度是在地震预报工作中选择电极距的依据。

但是在 $h = \frac{AB}{2}$ 的范围内浅层部分电阻率变化的影响比深层部分的变化影响大还是小? 请自己去分析一下。

五、电测深法简介

电测深法是利用不同供电电极距来测量同一测点的 ρ_k , 以获得测点处的地电剖面的方法。我们可以通过下面的例子来说明其本质。

设在厚为 h_1 , 电阻率为 ρ_1 的埤土下, 埋着电阻率为 ρ_2 的基岩。地面和基岩表面都是水平的。基岩分布的深度为无限大 ($h_2 \rightarrow \infty$)。如果在 O 点用 $\frac{A_1 B_1}{2} < h_1$ 的装置 (图17) 测量 ρ_k , 因为电流分布差不多都在 ρ_1 层内,

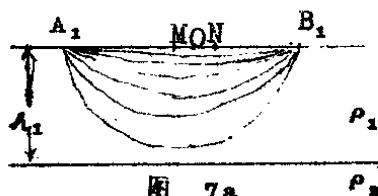


图 7a

故测出来的 $\rho_k = \rho_1$ 。如果不改变 MN 的位置而增大供电电极距 A_2B_2 (图 7b)。这时 $\frac{A_2B_2}{2} > h_1$ ，电流分布已达到基岩层内，基岩对视电阻率就发生作用，故 ρ_k 就介于 ρ_1 与 ρ_2 。

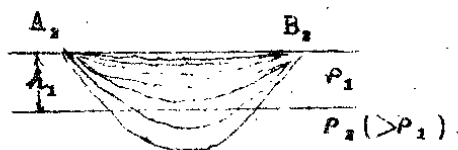


图 7b

之间。当再增大电极距至 $A_2B_2 \gg h_1$ ，这时供下去的电流绝大部分已分布在 ρ_2 内， ρ_1 层相对说来已很薄。对 ρ_k 不发生太大的影响了，所以 ρ_k 就趋于 ρ_2 。



图 7c

图 8 画出了 ρ_k 和 $\frac{AB}{2}$ 的关系曲线。即电测深曲线。利用它可以确定基岩的埋藏深度 h_1 和电阻率。至于如何确定 h_1 ，

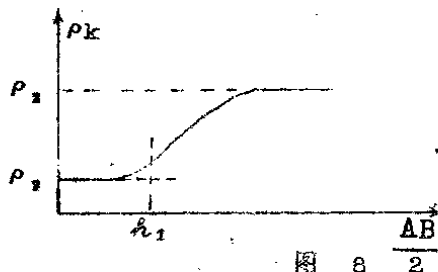


图 8

可用理论曲线与实测曲线对此定出。下面先介绍了理论曲线后再提到对比的办法。

对于三层或更多层的地质剖面，电测深曲线的性质就更复杂。

六、二层剖面的电测深理论曲线及使用办法。

数理方程的讲义里，作为一个例子，用镜像法已推出二层剖面的地质结构的 ΔV 公式。四极对称装置的电阻率公式 $\rho_k = K \frac{\Delta V}{I}$ 中的 $K = \pi \frac{l^2 - a^2}{2a}$ 。 l 等于 $\frac{AB}{2}$ ，

$a = \frac{MN}{2}$ 。这时， ρ_k 的理论公式为：

$$\rho_k = \rho_1 \left[1 + \frac{l^2 - a^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} K_n \frac{1}{\sqrt{(2n\lambda_1)^2 + (l-a)^2}} \frac{1}{\sqrt{(2n\lambda_1)^2 + (l+a)^2}} \right]$$

式中的 $K_{1,2} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ ， ρ_2 是底下那层的电阻率， ρ_1 是上面一层的电阻率， λ_1 是上面那层的厚度。

由公式中可以看出，总括号内的后一项是无穷级数。这个级数里随 n 的次数加大，该级数项的绝对值逐次减小。这表示多次的镜像电源，由于离地面测量点的距离越远，对地表电场的作用越来越小。所以，利用这个公式作理论曲线的计算时，只要计算 n 的若干项就够了。

从上式看来， ρ_k 是参量 $\rho_1, \rho_2, \lambda_1, l, a$ 的函数。在计算理论曲线时，我们假设 $a \rightarrow 0$ 。作实际的电测深曲线时，

一般取 $a \leq \frac{\ell}{3}$, 即 $\frac{MN}{2} \leq \frac{1}{3} \cdot \frac{AB}{2}$ 。因为 $a < \frac{\ell}{3}$ 的情

况下算出的理论曲线和 $a \rightarrow 0$ 时算出的理论曲线相差无几。

可是这么一来, 计算理论曲线就简化多了。

$$\begin{aligned} \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\ell^2 - a^2}{a} & \left(\frac{1}{\sqrt{(2nh_1)^2 + (\ell - a)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(2nh_1)^2 + (\ell + a)^2}} \right) \\ &= \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\ell^2 - a^2}{a} \frac{\sqrt{(2nh_1)^2 + (\ell + a)^2} - \sqrt{(2nh_1)^2 + (\ell - a)^2}}{\sqrt{(2nh_1)^2 + (\ell - a)^2} \sqrt{(2nh_1)^2 + (\ell + a)^2}} \\ &= \frac{\ell^2}{a} \cdot \frac{[(2nh_1)^2 + \ell^2 + 2\ell a + a^2]^{\frac{1}{2}} - [(2nh_1)^2 + \ell^2 - 2\ell a + a^2]^{\frac{1}{2}}}{(2nh_1)^2 + \ell^2} \\ &= \frac{\ell^2}{a} \cdot \frac{[(2nh_1)^2 + \ell^2]^{\frac{1}{2}}}{(2nh_1)^2 + \ell^2} \cdot \left\{ \left[1 + \frac{2\ell a + a^2}{(2nh_1)^2 + \ell^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right. \\ &\quad \left. - \left[1 + \frac{-2\ell a + a^2}{(2nh_1)^2 + \ell^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \\ &= \frac{\ell^2}{a} \cdot \frac{1}{[(2nh_1)^2 + \ell^2]^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{2\ell a}{(2nh_1)^2 + \ell^2} \\ &= \frac{2\ell^3}{[(2nh_1)^2 + \ell^2]^{\frac{3}{2}}} \end{aligned}$$

$$\therefore \rho_k = \rho_1 \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_n^n \ell^3}{[(2nh_1)^2 + \ell^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \dots\dots\dots (6.1)$$

事实上, 如按公式 (6.1) 直接来计算理论曲线, 则无论是哪层电阻率或 h_1 一变, 即能得出一条新的曲线。这样所需要的理论曲线就不胜其多, 不但计算繁复, 而且给使用亦