

关于层状介质视电阻率响应系数的研究

杨明芝 张文孝 赵和云

(宁夏地震局)

摘 要

本文从水平层状介质的电法理论出发,定义了电性层的响应系数 S_i ,并指出: S_i 代表各层电阻率的变化对 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 贡献的“权”,同时还给出了二层、三层和深埋电极时 S_i 的计算公式和部分计算结果,着重讨论了电性结构对表层响应系数 S_1 和底层响应系数 S_n 的影响。最后以此理论讨论了九个地电台站的具体情况。

根据理论和实际资料的分析,得出以下几点结论:

1) 从电性上,台址最佳观测条件是:表层响应系数 $S_1=0$;底层响应系数 $S_n=1$ 。

2) 台址的表层电阻率 ρ_1 高一些,底层电阻率 ρ_3 低一点,比较接近最佳观测条件。但各层电阻率之间的搭配关系需有一定范围,过高或过低的值都会偏离最佳观测条件。

3) 仅仅以电性剖面类型区分台址电性条件的优劣是不完善的,最好通过具体计算 S_i 来评判。

前 言

我国预报地震的电阻率法台站主要采用四极对称装置定点观测地电阻率随时间的变化。在目前的几百米至二、三千米的供电极距条件下,探测范围仅限于浅层。在观测资料分析中,如何从多因素干扰背景上提取地震信息,如何合理评价地电台站的台址条件等等,都必须涉及到探测体的电性结构特征的研究。

已有文献^[1-8]讨论了电性剖面对 ρ_s 变化的影响。本文在此基础上,从一般的电法基础理论出发,将表层和深部电阻率变化用“层响应系数 S_i ”联系起来,研究了前兆观测值 ρ_s 的变化与层电阻率变化的定性、定量关系。并对更为复杂而常用的三层剖面的响应系数进行了定量计算。在分析这些结果的基础上指出了减小表层干扰突出深部信息的具体途径。

一、层响应系数理论及物理意义

多数台站的地下介质可近似看作一个半无限均匀的水平多层介质。由电法理论知道,对

于一个固定的测量装置而言,其观测值 ρ_s 是各层电阻率 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ 以及层厚度 $h_1, h_2, \dots, h_n$ 的函数,即

$$\rho_s = f(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n; h_1, h_2, \dots, h_n) \quad (1)$$

若认为观测到的地电阻率 ρ_s 的变化 $\Delta\rho_s$ 仅由各层电阻率变化所引起,则求 ρ_s 对 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ 的全微分得到:

$$\Delta\rho_s = \frac{\partial f}{\partial \rho_1} \Delta\rho_1 + \frac{\partial f}{\partial \rho_2} \Delta\rho_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial \rho_n} \Delta\rho_n \quad (2)$$

一般人们更重视的是 ρ_s 的相对变化量,所以将(2)式改写成:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} = & \left(\frac{\rho_1}{\rho_s} \frac{\partial f}{\partial \rho_1} \right) \frac{\Delta\rho_1}{\rho_1} + \left(\frac{\rho_2}{\rho_s} \frac{\partial f}{\partial \rho_2} \right) \frac{\Delta\rho_2}{\rho_2} + \dots \\ & + \left(\frac{\rho_n}{\rho_s} \frac{\partial f}{\partial \rho_n} \right) \frac{\Delta\rho_n}{\rho_n} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{令} \quad S_i = \frac{\rho_i}{\rho_s} \frac{\partial f}{\partial \rho_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\text{则有} \quad \Delta\rho_s/\rho_s = \sum_{i=1}^n S_i \frac{\Delta\rho_i}{\rho_i} \quad (5)$$

S_i 为 ρ_s 对第 i 电性层的响应系数。一般情况下,响应系数 S_i 是各层电阻率 ρ_j ($j = 1, 2, \dots, n$)和各层厚度 h_j ($j = 1, 2, \dots, n$)的函数,并依赖于测量装置参数。

由于半无限层状介质的 ρ_s 表达式具有以下形式:

$$F\left(\frac{\rho_1}{\rho_1}, \frac{\rho_2}{\rho_1}, \dots, \frac{\rho_n}{\rho_1}; h_1, h_2, \dots, h_n\right) = 0$$

从数学上可以证明

$$S_1 + S_2 + \dots + S_n = 1 \quad (6)$$

即各层响应系数的代数和等于一。

从(5)式和(6)式可以看出响应系数 S_i 的物理意义,它反映了某层电阻率变化量 $\Delta\rho_i/\rho_i$ 对观测值 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 的影响程度,也即各电性层对 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 贡献的“权”。 S_i 越大,说明 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 反映第 i 电性层电阻率变化 $\Delta\rho_i/\rho_i$ 也越显著,反之亦然。实践证明,与地震无关的干扰因素造成的电阻率变化总是浅部大于深部。为了排除干扰,要求 S_1 的绝对值要小;而地震信息来源于深部,为了观测地震前兆,需要 S_n 要大。因此,响应系数决定了一定装置条件下,观测值对各层电阻率变化的响应水平。

当 $n = 2$ 时,可以求出二层剖面响应系数:对于四极对称装置,表达式为:

$$S_2 = \frac{(1 - K_{12}^2) \sum_{n=1}^{\infty} n K_{12}^{2n-1} D_n}{2 \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^{2n} D_n \right)} \quad (7)$$

$$S_1 = 1 - S_2$$

$$\text{其中:} \quad D_n = \frac{L^2 - l^2}{1} \left\{ [(L-1)^2 + (2nh)^2]^{-\frac{1}{2}} - [(L+1)^2 + (2nh)^2]^{-\frac{1}{2}} \right\},$$

$L = \frac{1}{2} AB$, $l = \frac{1}{2} MN$, $K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$, h 为第一层厚度。

当 $n = 3$ 时, 求得三层响应系数:

$$S_1 = \frac{1 + \sum_{n=1}^{\infty} (b_n + \rho_1 \frac{\partial b_n}{\partial \rho_1}) \phi_n}{1 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \phi_n} \quad (8)$$

$$S_3 = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \rho_3 \frac{\partial b_n}{\partial \rho_3} \phi_n}{1 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \phi_n} \quad (9)$$

$$S_2 = 1 - S_1 - S_3$$

其中 b_n 为发射系数^[4]

$$\phi_n = \frac{L^2 - l^2}{1} \left\{ \left[(L-l)^2 + (2nH_0)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - \left[(L+l)^2 + (2nH_0)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\}$$

式中 H_0 为层埋深的共通量度, 其它符号含义同上。

能够证明, 底层响应系数具有渐近性质:

$$\begin{aligned} \lim_{\rho_n \rightarrow 0} S_n &= 0 \\ \lim_{\rho_n \rightarrow \infty} S_n &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

即当底层电阻率 ρ_n 趋于零或无穷时, 其底层响应系数 S_n 趋于零。可见, 对于底部为极低阻或极高阻的剖面, ρ_n 将不反映其深部的变化。显然, 由于 S_n 是个连续函数, 可推断 S_n 有极值存在。极大值的特性受电性结构和电阻率相对差异程度所控制。

二、响应系数 s_i 值的计算结果与分析

为了更好地揭示响应系数 S_i 与电性剖面结构的关系, 我们实际计算了二层和三层剖面的 S_i 值。计算中统一取测量极距 $MN = \frac{1}{3} AB$, 结果及讨论分述如下:

1. 二层剖面

二层剖面的 S_1 和 S_2 在文献^[3]中已大体给出。图1中给出了稍微细致的计算结果。由图可以看出。

(1) 层厚一定时, 下伏岩层为极低阻和极高阻, 即当 $\rho_2/\rho_1 \rightarrow 0$ 和 $\rho_2/\rho_1 \rightarrow \infty$ 时, $S_2 \rightarrow 0$ 。 S_2 曲线形状类似于概率曲线。当 ρ_2/ρ_1 变到某一特定值时, S_2 有极大值。极大值的位置并不在 $\rho_2/\rho_1 = 1$ 处, 而随 α 值的减小而向左侧(低阻端)偏移。因此, 本文结果与文献^[3]得出的关于上下岩层电性差异愈小愈有利于探测深部电阻率变化的结论不完全一致。实际上, S_2 的极大值点受剖面参数和测量装置参数控制。例如当 $\alpha = 0.1$ 时, S_2 极大值对应于 $\rho_2/\rho_1 = 0.1$

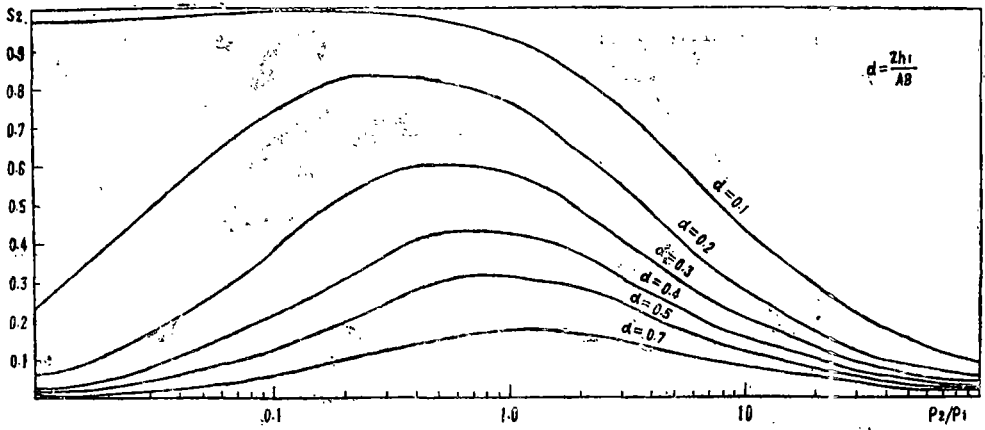


图 1 二层剖面 S_2 与 $\alpha = 2 h_1/AB$, ρ_2/ρ_1 关系图

Fig. 1 Relationship of S_2 versus $\alpha = 2 h_1/AB$, ρ_2/ρ_1 for two-layer

的剖面。可见，在此种情况下，最有利的剖面并不是 $\rho_2/\rho_1 = 1$ 的均匀情况。一般来说，对于 $0.1 < \alpha < 0.5$ ，比值 ρ_2/ρ_1 约在0.1到0.9范围内变动。

(2) 由于 S_2 随 α 减小而增大， α 愈小， S_2 极大值也愈大， S_2 随 ρ_2/ρ_1 向高端和低端变化时趋于零的速度也愈慢。同时，当 α 小于某一值时，低阻端 S_2 趋于零的速度较高阻端慢。

(3) 当增大供电电极距时，对于减小表层干扰和增大深部信息，低阻型剖面的效果要比高阻剖面好。

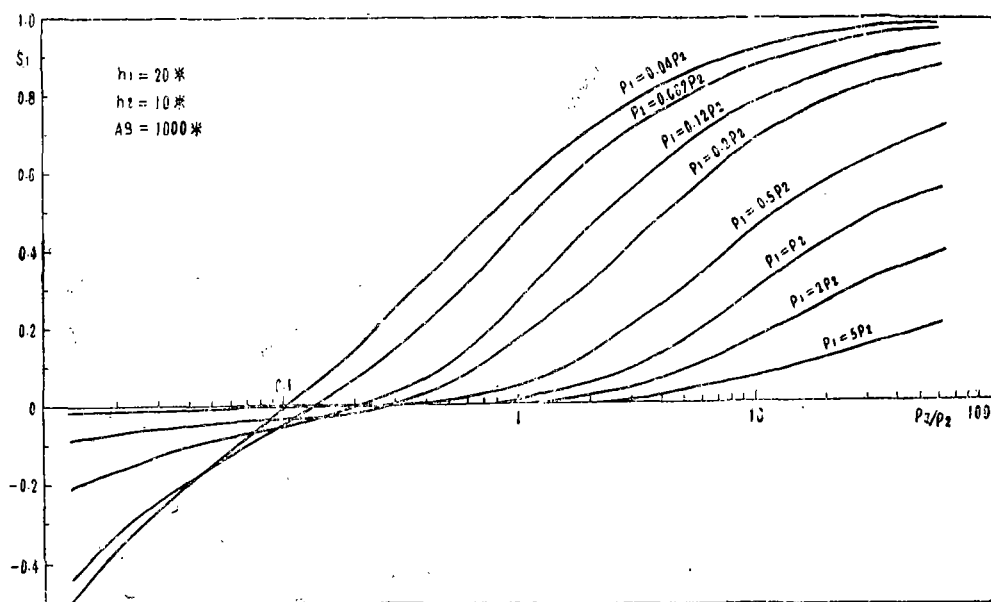
2. 三层剖面

由于受中间层的影响，三层剖面的情况要比二层剖面复杂得多。为了简单，本文只讨论对观测最有意义的 S_1 、 S_3 与剖面参数的关系。 S_1 、 S_3 的计算结果列在表1中。

表 1

ρ_1/ρ_2	ρ_3/ρ_2	ρ_3/ρ_1	S_1	S_3	ρ_1/ρ_2	ρ_3/ρ_2	ρ_3/ρ_1	S_1	S_3
$\frac{1}{25}$	0.0125	0.552	-0.507	0.654	25	0.0125	0.001	-0.037	1.000
	0.0625	1.911	-0.097	0.835		0.0625	0.003	-0.000	1.000
	0.125	3.391	0.047	0.809		0.125	0.005	-0.000	1.000
	0.625	10.253	0.446	0.532		0.625	0.025	-0.000	0.999
	1.25	13.935	0.616	0.364		1.25	0.050	0.000	0.994
	6.25	16.929	0.868	0.114		6.25	0.238	0.007	0.904
	12.5	21.161	0.918	0.063		12.5	0.427	0.017	0.776
	62.5	22.321	0.966	0.014		62.5	1.068	0.047	0.363
$\frac{1}{5}$	0.0125	0.066	-0.086	0.987	5	0.0125	0.003	-0.001	1.000
	0.0625	0.328	-0.048	0.994		0.0625	0.013	-0.001	1.000
	0.125	0.652	-0.034	0.988		0.125	0.025	-0.001	1.000
	0.625	3.030	0.080	0.887		0.625	0.126	-0.001	0.997
	1.25	5.380	0.206	0.760		1.25	0.251	0.002	0.990
	6.25	13.203	0.583	0.357		6.25	1.154	0.038	0.863
	12.5	16.097	0.707	0.222		12.5	2.000	0.082	0.713
	62.5	19.712	0.855	0.059		62.5	4.491	0.198	0.306

$h_1 = 20$ 米、 $h_2 = 10$ 米、 $AB = 1000$ 米

图2 三层剖面的 S_1 与剖面参数 ρ_1/ρ_2 、 ρ_3/ρ_2 的关系图Fig. 2 Relationship of S_1 versus the profile parameters ρ_1/ρ_2 , ρ_3/ρ_2 for three-layer(1) 表层响应系数 S_1

在层厚与极距固定的情况下, S_1 与各层电阻率的关系如表1和图2所示。由表1和图2可以看出:

a. 随着参数 ρ_1 、 ρ_2 和 ρ_3 之间不同的搭配关系, S_1 可以出现正值、负值和零。由图可见, 对于A型、H型地电断面, $S_1 > 0$; K型、Q型断面的 S_1 值可以为正, 也可以为负。

b. S_1 随 ρ_1 增加而逐渐减小。 ρ_1 一定, S_1 又随 ρ_3/ρ_2 的减少而减小, 当超过某一个 ρ_3/ρ_2 值时, S_1 出现负值。由此可见, 当 ρ_1 下伏低阻层时, S_1 的值较小些。但 ρ_3 与 ρ_2 不宜相差太大, 即无论 $\rho_3 \gg \rho_2$, 或 $\rho_2 \gg \rho_3$, 都会引起 S_1 绝对值的增加。

c. 在极距和层厚一定时, 在一些特殊的电性参数搭配上, 有 $S_1 = 0$ 。无疑, 地电台址选择在这些电性剖面上, ρ_s 的观测将不受表层干扰的影响。

(2) 底层响应系数 S_3

在层厚和供电极距一定的条件下, S_3 与各层电阻率的关系如表1和图3所示。由表1和图3可以看出

a. 对于每一给定的 ρ_1 , 曲线都出现极大值。但无论极值大小, 曲线峰值宽度(定义为 $\frac{\sqrt{2}}{2} S_{3\max}$ 的曲线宽度)都随 ρ_1 的减小而减小、变窄。并且极值位置向左移动。这表明 ρ_1 之下为低阻层时, S_3 大, 且 ρ_3/ρ_2 的变化范围比较宽; 反之, 当 ρ_1 之下为高阻层时, S_3 会减小, 并且对应于大的 S_3 值, ρ_3/ρ_2 的变化范围相对减小。

b. 当 $\rho_3 \gg \rho_2$ 或 $\rho_3 \ll \rho_2$ 时, S_3 减小并趋于零。即 ρ_3 不宜与 ρ_2 相差太大。

c. S_3 与地电断面类型的关系并不是一种固定的简单关系。不能笼统地讲, Q型断面一定比A型断面的 S_3 大, 有可能某一种A型断面上 S_3 要比另一种Q型断面的 S_3 值大。 S_3 值的大小

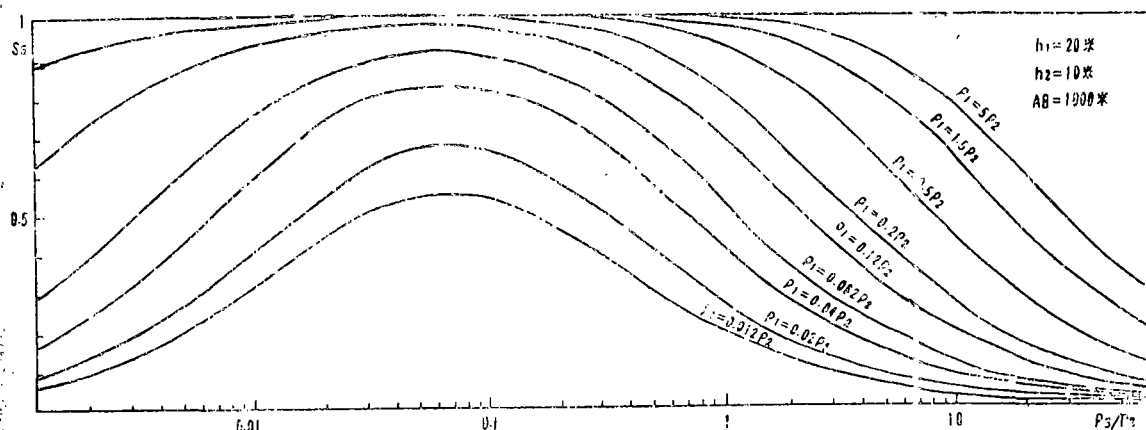


图3 三层剖面的 S_3 与剖面参数 ρ_1/ρ_2 、 ρ_3/ρ_2 关系图

Fig. 3 Relationship of S_3 versus the profile parameters ρ_1/ρ_2 , ρ_3/ρ_2 for three-layer

要由具体断面参数决定。若以各种类型断面上可以出现的最大 S_3 值来比较,其顺序为,Q型—H型—K型—A型。

(3) 响应系数与复盖层厚度H的关系

一般来说,可以将三层断面的第一层看作干扰层,第二层为过渡层,第三层为探测层。把一、二层统一考虑,定义为电性复盖层(与地质上的复盖层含义略有不同),复盖层厚度 $H_2 = h_1 + h_2$ (h_1 , h_2 分别为一、二层层厚)。计算了不同 H_2 时底层响应系数 S_3 的值,如表2和图4所示。结果表明,当测量装置固定时, S_3 随 H_2 增加而减小。

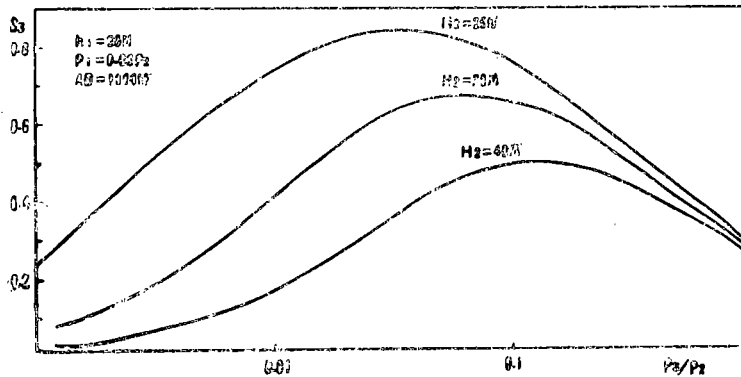
文献〔5〕从震例上研究了浮土厚度对地电阻率异常的影响,认为在相同测量装置和相同震中距的条件下,浮土越薄,地电阻率异常量 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 就越大。这一结论与本文结果一致。因为在相同的条件下, H 越小,其底层响应系数 S_3 越大。当 ρ_3 的变化相同时, $\Delta\rho_s/\rho_s = S_3\Delta\rho_3/\rho_3$ 也就越显著。

(4) 响应系数与供电电极距AB的关系

表2

S_3 h_2 (米)	ρ_3/ρ_2 0.0125		ρ_3/ρ_2 0.125		ρ_3/ρ_2 3.75	
	ρ_1/ρ_2		ρ_1/ρ_2		ρ_1/ρ_2	
	0.2	5	0.2	5	0.2	5
5	0.9999	0.9996	0.9983	1.0000	0.6706	0.9800
10	0.9997	0.9995	0.9976	0.9998	0.6451	0.9488
20	0.9791	1.0000	0.9929	0.9997	0.5390	0.8730
50	0.4639	0.9607	0.8740	0.9933	0.4896	0.6741
100	0.1021	0.2722	0.4952	0.7623	0.3861	0.4716

$h_1 = 10$ 米 $AB = 1000$ 米

图4 S_3 与复盖层厚度 H_2 关系图Fig. 4 Relationship of S_3 versus the thickness of the overburden H_2

层响应系数 S_1 、 S_3 与极距 AB 的依赖关系由表3和图5给出。

由表3和图5可见,随着供电电极距增大,表层响应系数 S_1 减小,底层响应系数 S_3 增大。因此,原则上讲,不管何种类型剖面,加大供电电极距 AB 总可以减小表层干扰而提高观测深部信息的能力。但是,当下伏岩石为高阻的情况下,用加大供电电极距的方法提高 S_3 的效果甚微。而下伏为低阻岩石时,其效果要明显些,尤其对表层为高阻的Q型剖面效果更佳。当然,用加大供电电极距的办法提高地电观测能力要受到技术条件的限制,其作用也是十分有限的。

3. 深埋电极装置情况下的响应系数

为了探索电阻率法预报地震,国内有人提出采用深埋电极的方法^[6]减小表层干扰,以观测深部信息。本文利用上述响应系数分析方法,具体计算了二层剖面深埋电极情况下的层响应系数。

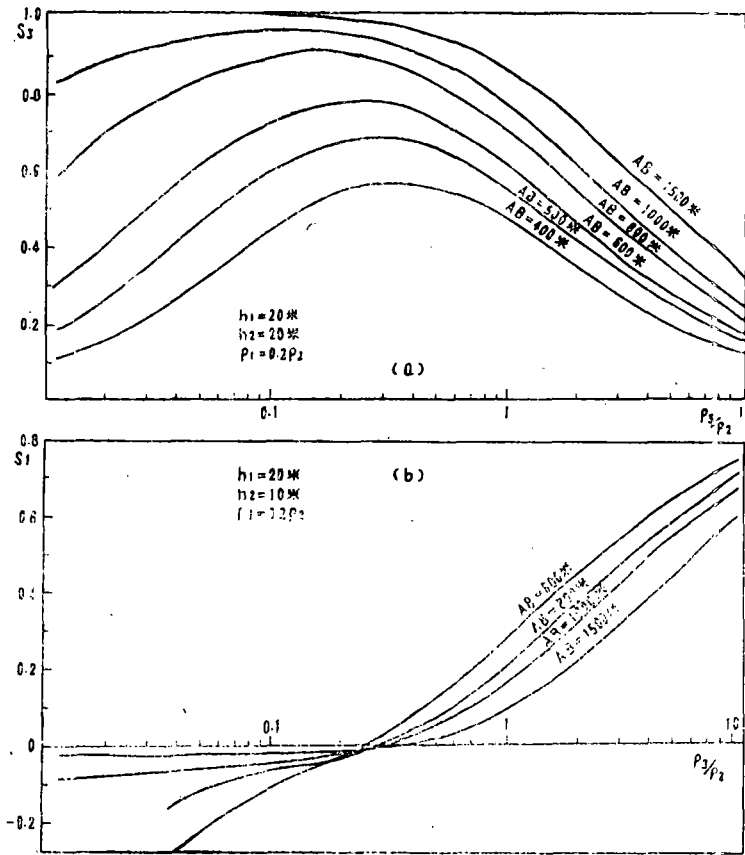
设第一层厚度为 H_1 ,电极埋深为 H_0 。当只考虑 $H_0 \geq H_1$ 即电极埋入第二层的情况时,通过数学推导,可以得出深埋电极的视电阻率公式:

$$\rho_s = \frac{\rho_2}{\phi_0} \left\{ \phi_0 - K_{12}\phi_1 - K_{12}^2\phi_2 + (1 - K_{12}^2) \sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n \phi(n) \right\} \dots\dots\dots (11)$$

表3

ρ_1/ρ_2	0.2						0.5					
ρ_3/ρ_2	0.0225		0.25		2.25		0.0225		0.25		2.25	
$AB(\text{米})$	S_1	S_3	S_1	S_3	S_1	S_3	S_1	S_3	S_1	S_3	S_1	S_3
400	-0.280	0.177	0.077	0.548	0.461	0.325	-0.123	0.646	-0.029	0.930	0.037	0.738
500	-0.487	0.289	-0.001	0.680	0.498	0.384	-0.068	0.913	-0.018	0.982	0.028	0.802
600	-0.596	0.428	-0.040	0.778	0.457	0.434	-0.025	0.984	-0.010	0.994	0.022	0.845
800	-0.528	0.715	0.056	0.894	0.389	0.517	-0.006	0.999	-0.004	0.998	0.014	0.898
1000	-0.306	0.896	-0.047	0.946	0.336	0.583	-0.003	0.999	-0.003	0.999	0.010	0.928
1500	-0.056	0.995	-0.022	0.985	0.244	0.698	-0.001	1.000	-0.001	0.999	0.005	0.964

$h_1 = h_2 = 20\text{米}$

图5 S₃ (a) 和 S₁ (b) 与供电电极距 AB 的关系图Fig. 5 Relationship of S₃ (a) and S₁ (b) versus AB (electrode interval)

而层响应系数表达式为:

$$S_{D1} = \frac{(1 - K_{12}^2) \left\{ \phi_1 + 2K_{12}\phi_2 + \sum_{n=1}^{\infty} [(n+2)K_{12}^2 - n] K_{12}^{2n-1} \Phi(n) \right\}}{2 \left\{ \phi_0 - [K_{12}\phi_1 + K_{12}^2\phi_2 - (1 - K_{12}^2) \sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^{2n} \Phi(n)] \right\}} \quad (12)$$

$$S_{D2} = 1 - S_{D1} \quad (13)$$

公式 (11)、(12) 中

$$\phi_0 = \left(\frac{1}{\sqrt{r_{AM}^2 + 4H_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{r_{AN}^2 + 4H_0^2}} \right) + \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AN}} \right)$$

$$\phi_1 = \frac{1}{\sqrt{r_{AM}^2 + 4(H_0 - H_1)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r_{AN}^2 + 4(H_0 - H_1)^2}}$$

$$\phi_2 = \frac{1}{\sqrt{r_{AM}^2 + 4H_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{r_{AN}^2 + 4H_0^2}}$$

$$\Phi(n) = \frac{1}{\sqrt{r_{AM}^2 + 4(H_0 + nH_1)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r_{AN}^2 + 4(H_0 + nH_1)^2}}$$

式中 r_{AM} 、 r_{AN} 分别为电极之间的距离。

图6给出了 S_{D2} 的计算结果。计算中取 $AB = 30$ 米, $MN = \frac{1}{3}AB$, $H_1 = 20$ 米。

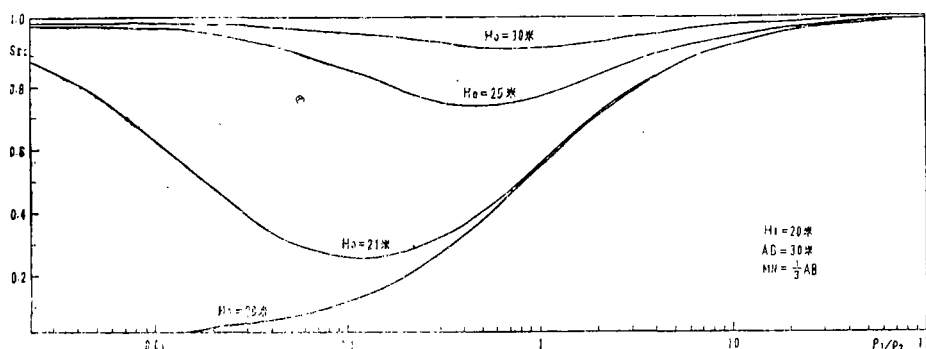


图6 二层剖面 S_{D2} 与电极埋深 H_0 的关系图

Fig. 6 Relationship of S_{D2} versus H_0 (electrode buried depth) for two-layer

总的来看,随着电极加深,第二层响应系数 S_{D2} 增大。但是,由于 S_{D2} 受断面参数和装置参数的控制,在同一深度下,不同的 ρ_1 、 ρ_2 搭配关系,对应的 S_{D2} 不同。为了要达到某一给定的 S_{D2} 值,不同的地电断面需要的电极深度是不同的。图6中 S_{D2} 曲线类似于一个倒置的概率曲线。当在 $\rho_2 \gg \rho_1$ 和 $\rho_2 \ll \rho_1$ 两种情况下, S_{D2} 以1为极限。在埋深 H_0 一定时,存在一个特定的地电断面, S_{D2} 有极小值。极小值随 H_0 减小向左端偏移。这一曲线形态可作如下解释:当 $\rho_2 \gg \rho_1$ 时,只要电极埋入第二层介质内,电极平面之上的第一层介质高阻屏蔽效应将使供电电流不能穿过分界面进入第一层,于是 ρ_s 主要反映电极周围第二层介质的情况。对于 $\rho_2 \ll \rho_1$,因为是低阻剖面情况,显然也有 $S_{D2} \approx 1$ 。而在 ρ_1 、 ρ_2 的其它情况下, ρ_s 即反映第二层,也反映第一层,其 $S_{D2} < 1$ 。

因此,电极埋深 H_0 的大小要根据具体剖面情况进行选择。当 $\rho_2 \gg \rho_1$ 时,只要将电极埋入第二层内不太大的深度,就足以消除表层影响。电极埋入太深是不必要的。在 S_{D2} 的极小值附近,取电极深度 H_0 约等于供电电极距 AB 的一倍半,便可以达到基本消除表层干扰的目的。这与现有实验结果一致。

三、实际资料分析

我们根据部分地电台站台址的电测深曲线,实际计算了各台电性断面各层响应系数,计算结果列在表4中。

从表4看出,由于台址电性结构不同,其探测体内各电性层的响应系数差别很大。与实际观测资料对比,表层响应系数 S_1 大的台站,年变幅度也大。并且 S_1 的正负也与实际观测的年变类型一致。例如邢台台, S_1 值约为15.4%,根据公式 $\Delta \rho_s / \rho_s = S_1 \Delta \rho_1 / \rho_1$,只要表

表 4

台 站 响应系数	临 沂	昌 黎	唐 山	邢 台	兰 州	武 威	银 川	中 卫	西 吉
$S_1(\%)$	75	11.0	5.3	15.4	-0.1	-26.0	1.9	-0.1	-1.7
$S_2(\%)$	25	68.8	65.8	78.0	0.6	117.0	32.0	2.4	2.2
$S_3(\%)$		20.2	28.9	6.6	99.5	9.0	66.1	97.7	99.5

层 ρ_1 变化30%，就可造成实际观测的 ρ_s 的5%的年变化量。甘肃武威台是属于反向年变的例子。该台 S_1 值约为-26%，实际观测的 ρ_s 变化为冬低夏高反常年变型，幅度约3%。这些实际的资料与理论分析基本上吻合。可见，用表层响应系数 S_1 能够说明台站观测 ρ_s 年变化的幅值和类型。

在一些情况下， ρ_s 的表层非周期干扰也受 S_1 的控制。例如，宁夏西吉台北东道1982年出现长期下降趋势，而同期该台周围的地下水位也逐渐下降，根据该台 S_1 为负值，不难解释， ρ_s 的下降是由于地下水位下降引起表层电阻率 ρ_1 升高造成的。

响应系数可以作为衡量台址电性好坏的指标。由前面给出的资料可以看出，兰州、中卫、西吉等台站 S_1 都很小，而 S_3 超过95%以上，说明只要这些台站下层介质电性在震源力的作用下发生变化，那么观测到的 ρ_s 就反映了深部的变化信息。

将1982年4月宁夏海原5.5级地震时，位于震中100公里范围内的中卫、西吉、海原三台 ρ_s 前兆异常量与响应系数 S_3 的对比关系列于表5中。由表5可见，各台异常量与 S_3 值的大小是完全一致的。从而证明 S_3 确实能够代表台站观测 ρ_s 前兆能力的指标。

表 5

台 站	震中距(公里)	S_3	最大异常量 $\Delta\rho_s/\rho_s$
海 原	25	84%	1.9%
中 卫	82	97.7%	7.7%
西 吉	90	99.5%	9.0%

还有一些台站，虽然它们的底层响应系数 S_3 比较小，但却具备一种特殊的电性和力学结构，其第二层反应地震可能比较灵敏。例如昌黎台。很多文章讨论了该台的情况，但从响应系数来分析，该台第二层响应系数比较大(69%)，加上底层为高阻基岩，传播应力比较好，因此，在唐山地震前该台观测到比较明显的 ρ_s 异常变化。

临沂、武威、银川等台站的表层响应系数比较大，而底层响应系数比较小，从电性上说，这些台站的电性条件是比较差的。

四、结 论

综上所述，可以得出以下几点结论：

(1) 从电性上说，存在地电阻率观测台址的最佳理论电性条件，这个条件可以表述

为: 在一些特殊的电性结构和装置条件下:

表层响应系数: $S_1 \approx 0$

底层响应系数: $S_3 \approx 1$

(14)

因此, 实际选择台址电性剖面 and 装置参数应尽量接近于条件(14), 以达到降低或消除表层干扰, 提高反映深层变化信息的能力。

(2) 适合于地电前兆观测的电性剖面参数的选择是有一定范围的。这个范围的大小, 因电性断面类型不同而差别很大。一般讲, 下伏岩石电阻率 ρ_3 过高或过低(对于二层为 ρ_2)对于探测深层信息和降低表层干扰都是不利的。在一个适当的 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 比值范围内(一般相差不大于二个数量级)选取低一点的 ρ_3 值和高一点的 ρ_1 值的电性剖面, 并适当选择电极距, 可以得到较理想的效果。

(3) 一个地电观测台站台址电性条件的好坏, 应权衡台址电性剖面结构的诸因素, 由具体参数值确定其表层响应系数 S_1 和底层响应系数 S_3 (或 S_2)的数值大小是否接近条件(14), 愈接近于条件(14), 说明台址电性条件愈好。反之, 则愈差。因此, 不应该笼统地根据剖面类型评价其观测能力大小或观测条件的优劣。

(4) 层响应系数不但在台址的选择上可做为定量指标, 而且在电阻率观测资料的分析处理中可作为基本台站参数。例如通过适当设计观测方案, 采用多极距平行观测, 测量上层电阻率随时间的变化, 可根据(5)式推求深层电阻率的变化量。特别是利用短极距同时观测了表层电阻率的变化 $\Delta\rho_1/\rho_1$, 若中间层响应系数 S_2 很小, 或电阻率变化 $\Delta\rho_2/\rho_2$ 很小时, 底层的变化 $\Delta\rho_3/\rho_3$ 可由(5)式求出, 即:

$$\frac{\Delta\rho_3}{\rho_3} = \frac{1}{S_3} \left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} - S_1 \frac{\Delta\rho_1}{\rho_1} \right) \quad (15)$$

该式对于分析异常, 特别是对于无法消除表层影响的台站, 提供了一种新的资料分析方法。

本文只是从电性上分析了地电阻率 ρ_3 变化与介质电性结构之间的关系, 而不涉及具体电阻率发生变化的机制。无疑, 要判断一个台站观测地震前兆的能力, 仅有电性条件是不够的。还必须考虑到介质的微结构条件、力学条件等等。也就是说一个好的台址, 既要有大的底层响应系数, 还要具备在震源的影响下易于产生底层电阻率较大的异常量($\Delta\rho_3/\rho_3$)的条件。

(本文1984年5月5日收到)

参 考 文 献

- [1] 金安忠, 地电阻率正常变化的初步研究, 地球物理学报, Vol.24, №1, 1981.
- [2] 金安忠, 地电阻率正常变化与电剖面的关系, 地震学报, Vol.3, №4, 1981.
- [3] 许秀芬等, 电阻率法在地震预报中的数理基础初探, 地震研究, Vol.3, №4, 1980.
- [4] 达赫诺夫〔苏〕, 石油与天然气产地电法勘探, 地质出版社, 1955.
- [5] 陈有发等, 岩性对地电阻率前兆的影响, 西北地震学报, Vol.4, №4, 1982.
- [6] 王帮本等, 深井电阻率与地震预报, 地震研究, Vol.4, №4, 1981.

THE STUDY ON THE RESPONSE COEFFICIENTS IN THE APPARENT RESISTIVITY IN HORIZONTAL LAYERED MEDIUM

Yang Mingzhi Zhang Wenxiao Zhao Heyun

(The Seismological Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region)

In this paper, the response coefficient S_i of geoelectrical layers is defined on the basis of the theory of the resistivity method in horizontal layered-medium. It is pointed out that the S_i represents weight of contribution to $\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}$ by variations of the resistivity of the layers. Then the expressions of S_i about two-layer, three-layer and the case of the deep buried electrode are brought out and some of numerical results and also obtained. Especially we have a discussion about the influence of the geo-electrical structure on the overlayer response coefficient S_i and the deep-layer response coefficient S_n . Finally, by means of this theory on S_i the practical cases about nine stations are discussed.

In accordance with this theory and practical data we can gain the conclusions as follows:

1) As for electrical property, the best-observing conditions for resistivity method stations are

overlayer response coefficient $S_1 = 0$

deep-layer response coefficient $S_n = 1$

2) The best observing condition for the station site chosen is that the overlayer resistivity may be greater and the deep layer, S smaller. The relation of the resistivities of the layers needs an opposite range of its value. When the value is too large or too small, a deviation from the best-observing conditions takes place.

3) It is not enough for a station to be selected only by the kinds of geoelectrical profiles. To determine a station site, S_i is always needed calculating with carefulness.