

聂永安, 巴振宁, 聂瑶. 2010. 深埋电极的地电阻率观测研究. 地震学报, 32(1): 33-40.
Nie Yongan, Ba Zhenning, Nie Yao. 2010. Study on buried electrode resistivity monitoring system. *Acta Seismologica Sinica*, 32(1): 33-40.

深埋电极的地电阻率观测研究^{*}

聂永安¹⁾^{*} 巴振宁²⁾ 聂 瑶²⁾

1) 中国天津 300201 天津市地震局

2) 中国天津 300072 天津大学

摘要 首先研究了四极观测系统装置系数与电极埋深的关系; 然后给出了点电流源在3层地壳模型的地表和第二层时, 电源所在层的电位的解析表达式; 最后将天津宝坻地区的电性结构简化成一个3层模型, 计算给出了当地表层和基岩中的电阻率出现变化时, 在地表和基岩上层开展四极地电阻率观测结果与供电极距和深度的关系.

关键词 深埋电极 装置系数 电位 视电阻率

doi: 10.3969/j.issn.0253-3782.2010.01.004 中图分类号: P315.72⁺² 文献标识码: A

Study on buried electrode resistivity monitoring system

Nie Yongan¹⁾^{*} Ba Zhenning²⁾ Nie Yao²⁾

1) *Earthquake Admininstration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China*

2) *Tianjin University, Tianjin 300072, China*

Abstract: At first, the relation between the coefficient of electrode arrangement and the depth of buried electrodes for a four-electrode resistivity monitoring system is given in this paper. Then, the electrical potentials of the layers, in which the source electrode is buried in a three-layer earth model, are presented. Based on the resistivity profile at Baodi station in Tianjin, we have calculated the variation of apparent resistivity with different intervals between two source electrodes and depths of buried electrodes, when the resistivity of the surface layer or the rock layer has changed.

Key words: buried electrodes; coefficient of electrode arrangement; electrical potential; apparent resistivity

引言

我国是从1966年邢台地震后把地电阻率变化作为地震前兆进行观测研究的, 其观测装置是从地质勘探中的直流电阻率法中移植并发展起来的, 一般采用四极对称观测系统, A极和B极为供电极, M极和N极为测量极. 目前, 我国地震地电阻率观测通常在固定台站的地表进行, A极和B极相距1000 m左右, 并通过它们向地下输送稳恒电流. 同时, 测

* 基金项目 天津市科技支撑计划重点项目《天津及周边地区地震中短期预测技术研究》(07ZCGYSF03100)资助.

收稿日期 2009-01-19 收到初稿, 2009-05-07 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: nie@mail.eq.tj.ac.cn

量 M 极与 N 极之间的电位差, 通过一定的公式计算出视电阻率(中国地震局, 2001).

自然界的岩石一般都具有一定的孔隙或裂隙, 在这些孔隙或裂隙中存在着不同浓度和化学成分的水溶液. 由于岩石中的水溶液经常溶解有一定的盐分, 其电阻率比造岩矿物低得多. 因此, 岩石的电阻率与其湿度和孔隙中水溶液的浓度和化学成分有着密切关系. 多数学者认为在大震孕育的后期, 在应力的作用下, 震源区的地下岩石中的孔隙或裂隙会进一步扩展和贯通, 地下水溶液会更多地进入岩石中的孔隙或裂隙, 使岩石的湿度增加、电阻率降低, 最终导致地表观测到的视电阻率出现变化.

40 多年的观测也表明, 大震前一般在震源区和其附近都会出现视电阻率的变化, 是一种比较可靠的中短期地震前兆(张国民等, 2001). 然而, 由于地电阻率观测通常在固定台站的地表进行, 降雨、气温、地下金属管线等因素都会影响近地表层的电阻率, 进而影响视电阻率的观测结果, 给前兆的判定带来很大困难. 另外, 为了探测到覆盖层下岩石的电阻率变化, 通常采用大极距的地表供电方式. 由于供电极距较大, 需要对环境进行保护的布极区的范围也较大, 使得对布极区的地震观测环境保护与当地经济和社会发展对观测环境的破坏之间的矛盾越来越突出.

化解这一矛盾的途径之一是采用深埋电极的地电阻率观测系统. 实际上, 早在多年前就已在天津、山东等地进行过深埋电极的地电阻率观测实验, 但由于不同实验地区地下电性结构的差异, 导致实验结果差异很大(王帮本等, 1981; 刘允秀等, 1985; 孟庆武, 阎洪朋, 1991). 另外, 由于缺乏系统的理论支持, 致使对实验结果的分析不够深入, 给不出明确的结论和建议.

最近, 也有学者建议将三侧向石油电测井技术移植到地震地电阻率的观测之中, 这一方案的优点是只需一个钻孔(田山等, 2009). 但是, 为了监视基岩的电阻率变化, 一个供电极必须置于基岩中的一定深度, 增加了供电的难度; 另外, 由于还有一个供电极位于地表, 地表层的变化对测量结果的影响似乎不可避免. 因此, 这一技术能否用于地震电阻率的长期监测, 还需进一步研究.

为了深入研究深埋电极的地电阻率观测的可行性, 本文首先研究了四极观测系统装置

系数与电极埋深的关系; 然后给出了点电流源在 3 层地壳模型的地表和第二层时, 电源所在层的电位的解析表达式; 最后将天津宝坻地区的电性结构简化成一个 3 层模型, 计算给出了当地表层和基岩中的电阻率出现变化时, 在地表和基岩上层开展四极地电阻率观测结果与供电极距和深度的关系.

1 装置系数与电极埋深的关系

对于图 1 所示的均匀半无限空间, 介质的电阻率为 ρ , 供电极 A 位于地下 H_0 深度处, 电流强度为 I . 若以电极 A 为原点建立坐标系, 则介质中任一点 (r, z) 的电位为

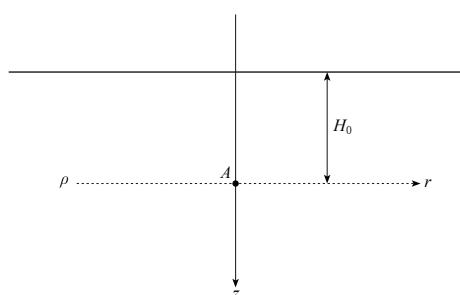


图 1 供电极在均匀半空间中的
坐标系示意图

Fig. 1 Coordinate system when the source electrode is buried in a homogeneous isotropic half-space medium

$$U_A(r, z) = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} + \frac{1}{\sqrt{r^2 + (2H_0 + z)^2}} \right) \quad (1)$$

这样, 与点电源 A 相距 r 且处同一深度的任一点 $(r, z=0)$ 的电位为

$$U_A(r, 0) = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\sqrt{r^2 + (2H_0)^2}} \right) \quad (2)$$

若我们采用四极观测装置, A 极和 B 极为供电极, M 极和 N 极为测量极, 且供电极与测量极位于同一深度, M 极与 N 极之间的电位差为 ΔU_{MN} , 则均匀介质的电阻率可表示为

$$\rho_a = K(H_0) \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (3)$$

式中

$$K(H_0) = \frac{4\pi}{C_A - C_B} \quad (4)$$

$$C_A = \frac{1}{\overline{AM}} + \frac{1}{\sqrt{\overline{AM}^2 + 4H_0^2}} - \frac{1}{\overline{BM}} - \frac{1}{\sqrt{\overline{BM}^2 + 4H_0^2}} \quad (5)$$

$$C_B = \frac{1}{\overline{AN}} + \frac{1}{\sqrt{\overline{AN}^2 + 4H_0^2}} - \frac{1}{\overline{BN}} - \frac{1}{\sqrt{\overline{BN}^2 + 4H_0^2}} \quad (6)$$

实际的地下介质并不是均匀、各向同性的, 如果我们采用四极测量装置, 并按照式(3)进行计算, 则计算出的数值并不能代表岩石的真电阻率, 而是地下不同介质电阻率的一种组合结果。为了与岩石的真电阻率加以区别, 我们另外给它一个名称, 叫做视电阻率, 并一般用 ρ_a 表示。由式(3)的定义可得, 当地下岩石均匀时, 所测得的视电阻率 ρ_a 就等于均匀岩石的真电阻率 ρ 。但当地下岩石是非均匀介质时, 视电阻率并不等于地下任何一部分岩石的电阻率, 它是由许多复杂的因素所决定的。

必须指出, 由于在任何不均匀情况下, 电位差值 (ΔU_{MN}) 总是与供电电流强度 I 成正比。所以, 视电阻率 ρ_a 与测量时的供电电流强度 I 无关, 而只与地下的不均匀情况和各电极的位置或排列方式等有关。这也是直流电阻率法的优点之一。

式(3)中的 K 就是深埋电极时四极观测系统的装置系数, 它不但与 A, B, M, N 之间的相对位置有关, 而且与电极的埋深有关。当 $\overline{AB} = L, \overline{AM} = \overline{BN} = 2L/5, \overline{MN} = L/5$ 时, $K/2\pi L$ 随 H_0/L 的变化关系如图 2 所示。

当 $H_0 = 0$ 时, 从式(4)、式(5)和式(6)可得

$$K(0) = \frac{2\pi}{\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}} - \frac{1}{\overline{AN}} + \frac{1}{\overline{BN}}} \quad (7)$$

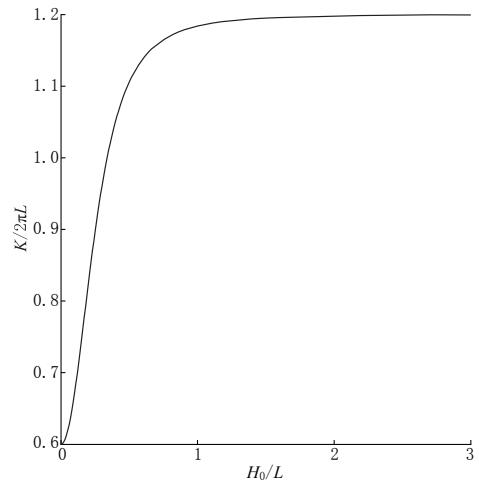


图 2 装置系数与电极埋深的关系

Fig. 2 Relation between the coefficient of electrode arrangement and the depth of buried electrodes

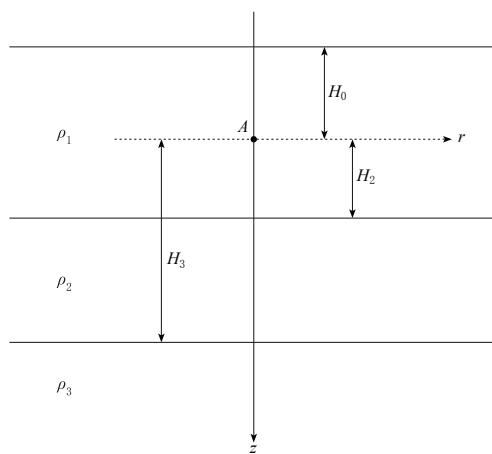


图 3 供电电极在 3 层模型表层中的坐标系示意图

Fig. 3 Coordinate system when the source electrode is buried within the surface layer of a 3-layer earth model

一层模拟地表层, 它易于受到环境变化的影响, 在地电阻率的前兆观测中被视为干扰; 第三层模拟地下基岩层, 它的电阻率变化才是前兆观测中感兴趣的信息; 第二层模拟常年水位以下、基岩层以上的饱和岩土层, 这一层的电阻率不易受到环境变化和构造变形的影响, 因此, 在我们的研究中假设这一层的电阻率不变.

2 电极位于 3 层模型表层中的电位分布

设供电电极 A 位于 3 层模型的第一层, 埋深为 H_0 , 供电电流强度为 I , 如图 3 所示. 模型第一层的电阻率为 ρ_1 , 厚度为 $H_0 + H_2$; 第二层的电阻率为 ρ_2 , 厚度为 $H_3 - H_2$; 第三层的电阻率为 ρ_3 .

若以电极 A 为原点建立坐标系, 则模型第一层中任一点 (r, z) 的电位为

$$U_1(r, z) = \frac{I}{4\pi} \int_0^\infty [\rho_1 \exp(-\lambda |z|) + A_1 \exp(-\lambda z) + B_1 \exp(\lambda z)] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (9)$$

式中

$$A_1 = \rho_1 \frac{\alpha(1+\beta)}{1-\alpha\beta} \quad B_1 = \rho_1 \frac{\beta(1+\alpha)}{1-\alpha\beta} \quad (10)$$

$$\alpha = \exp(-2\lambda H_0) \quad \beta = \frac{\frac{1}{\rho_1} - Q_2}{\frac{1}{\rho_1} + Q_2} \exp(-2\lambda H_2) \quad (11)$$

$$Q_2 = \frac{1}{\rho_2} \frac{\left(\frac{1}{\rho_2} + Q_3\right) - \left(\frac{1}{\rho_2} - Q_3\right) \exp[-2\lambda(H_3 - H_2)]}{\left(\frac{1}{\rho_2} + Q_3\right) + \left(\frac{1}{\rho_2} - Q_3\right) \exp[-2\lambda(H_3 - H_2)]} \quad Q_3 = \frac{1}{\rho_3} \quad (12)$$

这样, 与点电源 A 相距 r 且处同一深度的任一点 $(r, z=0)$ 的电位为

这就是通常的地表四极观测系统的装置系数. 而当 $H_0 = \infty$ 时, 可得

$$K(\infty) = \frac{4\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (8)$$

即 $K(\infty)$ 是 $K(0)$ 的 2 倍, 这一特性在图 2 中也反映出来了.

从图 2 可见, 装置系数随电极埋深的增加而增加, 当埋深超过供电电极的极距时装置系数基本不再增加, 实际上表示地表的影响可以予以忽略. 这说明当进行视电阻率测量时, 若采用深埋电极有可能避免地表干扰因素的影响.

为了深入研究地表层和地下岩石的电阻率变化对视电阻率观测值的影响, 我们把实际的地下结构简化为一个 3 层模型(图 3). 第

$$U_1(r, 0) = \frac{I}{4\pi} \int_0^\infty [\rho_1 + A_1 + B_1] J_0(\lambda r) d\lambda = \frac{I}{4\pi} \rho_1 \int_0^\infty F(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (13)$$

即

$$U_1(r, 0) = \frac{I}{4\pi} \frac{\rho_1}{r} \int_0^\infty F\left(\frac{\zeta}{r}\right) J_0(\zeta) d\zeta \quad (14)$$

式中

$$F(\lambda) = \frac{(1+\alpha)(1+\beta)}{1-\alpha\beta} \quad (15)$$

若采用四极观测装置, 则测量极 M 与 N 之间的电位差为

$$\Delta U_{MN} = U_1(\overline{AM}, 0) - U_1(\overline{BM}, 0) - U_1(\overline{AN}, 0) + U_1(\overline{BN}, 0) \quad (16)$$

这样, 便可利用式(3)求得观测装置埋深为 H_0 时的视电阻率值. 特别地, 如果在上面的各式中取 $H_0=0$, 则为通常的 3 层模型的地表观测结果.

3 电极位于 3 层模型第二层的电位分布

设供电电极 A 位于 3 层模型的第二层, 埋深为 H_1 , 供电电流强度为 I , 如图 4 所示. 模型第一层的电阻率为 ρ_1 , 厚度为 H_0-H_1 ; 第二层的电阻率为 ρ_2 , 厚度为 H_1+H_3 ; 第三层的电阻率为 ρ_3 .

若以电极 A 为原点建立坐标系, 则模型第二层中任一点 (r, z) 的电位为

$$U_2(r, z) = \frac{I}{4\pi} \int_0^\infty [\rho_2 \exp(-\lambda |z|) + A_2 \exp(-\lambda z) + B_2 \exp(\lambda z)] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (17)$$

式中

$$\begin{cases} A_2 = \rho_2 \frac{\alpha(1+\beta)}{1-\alpha\beta} \\ B_2 = \rho_2 \frac{\beta(1+\alpha)}{1-\alpha\beta} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\frac{1}{\rho_2} - Q_1}{\frac{1}{\rho_2} + Q_1} \exp(-2\lambda H_1) \\ \beta = \frac{\frac{1}{\rho_2} - Q_3}{\frac{1}{\rho_2} + Q_3} \exp(-2\lambda H_3) \end{cases} \quad (19)$$

$$Q_1 = \frac{1}{\rho_1} \frac{1 - \exp[-2\lambda(H_0 - H_1)]}{1 + \exp[-2\lambda(H_0 - H_1)]} \quad Q_3 = \frac{1}{\rho_3} \quad (20)$$

这样, 与点电源 A 相距 r 且处同一深度的任一点 $(r, z=0)$ 的电位为

$$U_2(r, 0) = \frac{I}{4\pi} \int_0^\infty [\rho_2 + A_2 + B_2] J_0(\lambda r) d\lambda = \frac{I}{4\pi} \frac{\rho_2}{r} \int_0^\infty F\left(\frac{\zeta}{r}\right) J_0(\zeta) d\zeta \quad (21)$$

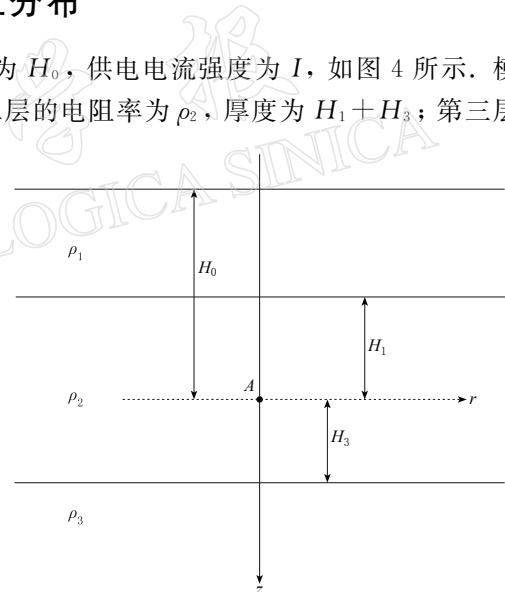


图 4 供电电极在三层模型第二层中的坐标系示意图

Fig. 4 Coordinate system when the source electrode is buried within the middle layer of a 3-layer earth model

上式中 $F(\lambda)$ 的表达式在形式上与式(15)完全相同.

对四极观测装置, 测量极 M 与 N 之间的电位差为

$$\Delta U_{MN} = U_2(\overline{AM}, 0) - U_2(\overline{BM}, 0) - U_2(\overline{AN}, 0) - U_2(\overline{BN}, 0) \quad (22)$$

这样, 同样可利用式(3)求得观测装置埋深为 H_0 时的视电阻率值.

4 电极埋深对视电阻率观测结果的影响

为了深入分析电极埋深和供电极距对视电阻率观测结果的影响, 我们以天津宝坻台的地电阻率观测为研究对象. 将宝坻台的地下电性结构等效简化成为一个 3 层模型, 通过模拟计算不同电极埋深、不同供电极距以及地表层和基岩层电阻率下降 5% 时的视电阻率观测结果, 研究电极埋深对视电阻率观测结果的影响.

这个计算模型的第一层模拟易受环境影响的近地表层, 厚度 65 m, 电阻率为 $\rho_1 = 24.2 \Omega \cdot m$; 第三层模拟产生前兆变化的基岩层, 埋深在 215 m 以下, 电阻率为 $\rho_3 = 168.0 \Omega \cdot m$; 第二层模拟不易受到环境影响的饱和岩土层, 厚度 150 m, 电阻率为 $\rho_2 = 36.5 \Omega \cdot m$. 四极观测装置的供电极距为 L , 装置埋深为 H_0 , 其中 $\overline{AM}/L = \overline{BN}/L = 2/5$, $\overline{MN}/L = 1/5$. 第一层的电阻率变化用 $\Delta\rho_1/\rho_1$ 表示; 第三层的电阻率变化用 $\Delta\rho_3/\rho_3$ 表示. 用 ρ_a 表示计算出的视电阻率观测结果, 其变化用 $\Delta\rho_a/\rho_a$ 表示. 表 1 为根据前面给出的有关理论研究结果, 计算得到的不同条件下的视电阻率观测结果.

表 1 不同条件下的视电阻率计算结果

Table 1 Calculated results of apparent resistivity under different conditions

H_0/m	L/m	$\Delta\rho_1/\rho_1$	$\Delta\rho_3/\rho_3$	$\rho_a/(\Omega \cdot m)$	$\Delta\rho_a/\rho_a$
0	1 000	0	0	55.6316	0
		-5%	0	54.7845	-1.52%
	1 000	0	-5%	54.9731	-1.18%
		-5%	0	71.1306	0
		0	-5%	70.1161	-1.43%
205	200	0	0	69.9853	-1.61%
		-5%	0	64.0487	0
		0	-5%	64.0545	+0.01%
	100	0	0	63.0491	-1.56%
		-5%	0	63.6834	0
		0	-5%	63.7647	+0.13%
	200	0	0	62.5942	-1.71%
		-5%	0	65.1704	0
		0	-5%	65.1782	+0.01%
210	200	0	-5%	64.1445	-1.57%
		-5%	0	67.2498	0
	100	0	0	67.3312	+0.12%
		-5%	-5%	66.0762	-1.75%

宝坻台的现行观测装置部署在地表 ($H_0 = 0$), 供电极距 1000 m. 从表 1 计算结果可见, 当地表或基岩的电阻率下降 5% 时, 视电阻率观测结果相应下降 1.52% 或 1.18%, 反映出地表层电阻率的变化比基岩电阻率的变化对视电阻率观测结果的影响更大.

如果将这一装置 ($L = 1000$ m) 从地表安放到地下距基岩面 10 m ($H_0 = 205$ m) 处, 当地

表或基岩的电阻率下降 5% 时, 视电阻率观测结果相应下降 1.43% 或 1.61%。此时虽然基岩电阻率的变化比地表层电阻率的变化对视电阻率观测结果的影响更大, 但地表层电阻率的变化对视电阻率观测结果仍影响不小。

随着供电极距的减小或电极埋深的增加, 地表层电阻率的变化对视电阻率观测结果的影响在减小, 而基岩电阻率的变化对视电阻率观测结果的影响在增大。特别是随着供电极距的进一步减小, 地表层电阻率的下降反而引起视电阻率观测结果的增大, 出现了所谓的“负异常现象”(Lu *et al.*, 2004)。

对于本文所研究的模型和采用的装置而言, 当供电极距 $L=200$ m, 电极埋深 $H_0=205$ —210 m 时, 基本可消除地表层电阻率的变化对视电阻率观测结果的影响, 而又可以显著提高视电阻率对基岩电阻率变化响应的灵敏度, 是我们研究所期望得到的结果。

5 讨论

为了深入研究深埋电极地电阻率观测的可行性, 本文首先从理论上研究了四极观测系统装置系数与电极埋深的关系; 然后给出了点电流源在 3 层地壳模型的地表和第二层时, 电源所在层的电位的解析表达式; 最后以天津宝坻地区的电性结构为例, 用一个等效简化的 3 层模型计算给出了当地表层和基岩中的电阻率出现变化时, 在地表和基岩上层开展四极地电阻率观测结果与供电极距和深度的关系。

装置系数随电极埋深的变化规律表明, 地表干扰的影响深度大致相当于一个供电极距。因此, 当基岩以上覆盖层的厚度大于一个供电极距时, 在地表的视电阻率观测很难反映地下基岩电阻率的变化, 这种观测也就失去了前兆观测的作用。

本文给出的点电流源在 3 层地壳模型的地表和第二层时, 电源所在层的电位的解析表达式与以往的其它结果(孙正江, 王华俊, 1984)相比形式简洁, 计算稳定、可靠、精度高, 既适合理论分析, 又方便数值计算。

本文根据分界面上电位和法向电流密度的连续性条件所定义的 Q , 与有关文献(葛为中, 1994; 钱家栋等, 1986)中定义的电阻率转换函数 T 互为倒数。当 $\lambda \rightarrow 0$ 时, 从式(20)可得 $Q_1 \rightarrow 0$ 。但这将导致上述文献中定义的 T_1 的分母为零, 而使计算无法进行。另外, 对水平层状介质地面点源问题, 葛为中(1994)给出的地表层电位被积函数的待定系数结果为 $A_1=B_1$ 。而本文式(10)结果表明, 此时, $A_1=\rho_1+B_1$ 。

算例数值计算结果表明, 地下观测装置可以减小甚至消除地表环境变化对视电阻率观测结果的影响, 而又能提高视电阻率对基岩电阻率变化响应的灵敏度, 这说明进行深埋电极的视电阻率观测是一条可行的途径。

地表环境变化对视电阻率观测结果的影响不但与电极的埋深有关, 更与供电极距的大小有关。对于一个特定的观测点而言, 究竟在什么深度上进行观测最好? 这不但取决于观测点下方的电性结构, 还取决于供电极距的大小、具体的装置方式和运行费用等, 应根据具体条件进行计算设计。

虽然实施视电阻率的地下观测仍有许多亟需解决的问题, 如电极的使用寿命及与电缆的连接等, 但本文的研究结果表明, 开展地下观测是直流地电阻率法的一个发展方向。

参 考 文 献

- 葛为中. 1994. 层状介质点源电场正演解析及其应用[J]. 地球物理学报, **37**(增刊Ⅱ): 534-541.
- 刘允秀, 吴国有, 王蕃树, 王帮本. 1985. 深埋电极地电阻率观测的实验结果[M]//地震预测: 地电方法论文集. 福州: 福建科学技术出版社: 206-216.
- 孟庆武, 阎洪朋. 1991. 临沂台深井电阻率异常变化与地震的关系[J]. 西北地震学报, **13**(4): 70-74.
- 钱家栋, 赵和云, 张文孝. 1986. 水平层状介质视电阻率的高精度计算公式及其误差分析[J]. 西北地震学报, **8**(2): 10-19.
- 孙正江, 王华俊(编). 1984. 地电概论[M]. 北京: 地震出版社: 96-192.
- 田山, 刘允秀, 聂永安, 马骥, 庞群英, 杜学彬. 2009. 地震地电阻率观测改进方法研究: 电测井技术的移植应用与数值模型分析. 地震学报, **31**(3): 272-281.
- 王帮本, 刘永兰, 李验轩. 1981. 深井电阻率与地震预报[J]. 地震研究, **4**(4): 398-403.
- 张国民, 傅征祥, 桂燮泰等(编著). 2001. 地震预报引论[M]. 北京: 科学出版社: 214-270.
- 中国地震局(编). 2001. 地震及前兆数字观测技术规范(试行): 电磁观测[M]. 北京: 地震出版社: 3-6.
- Lu J, Xue S Z, Qian F Y, Zhao Y L, Guan H P, Mao X J, Ruan A G, Yu S R, Xiao W J. 2004. Unexpected changes in resistivity monitoring for earthquakes of the Longmen Shan in Sichuan, China, with a fixed Schlumberger sounding array[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **145**: 87-97.