水平两层均匀介质中井下电阻率 观测信噪比的理论计算

解 滔1,杜学彬1,2,郑国磊1,陈军营1,2,谭大诚1,2,

安张辉1,2, 范莹莹1, 刘 君1

(1. 中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州 730000;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地,甘肃 兰州 730000)

摘 要:在点电源水平两层均匀介质模型下计算了在不同地电断面中观测时地表干扰电流源对观测 的影响。得到:地表干扰电流源对地电阻率观测电势差的影响取决于地电断面类型和参数、供电电 极和测量电极的埋深以及避开干扰源的距离。本文研究结果对实施井下电阻率观测中台址电性结 构选择、电极埋深、干扰源避让有参考意义。 关键词:水平两层均匀介质;地电阻率; 信噪比; 对称四极; 电势差

中图分类号; P319.3 文献标识码; A 文章编号: 1000-0844(2012)01-0018-05

Theoretical Calculation for the Signal Noise Ratio of the Underground Electric Resistivity Observation in the Two-layered Horizontal Homogeneous Medium

XIE Tao¹, DU Xue-bin^{1,2}, ZHENG Guo-lei¹, CHEN Jun-ying^{1,2}, TAN Da-cheng^{1,2},

AN Zhang-hui^{1,2}, FAN Ying-ying¹, LIU jun¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;
2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In the model of homogeneous medium of two horizontal layers, the effect caused by disturb current on surface when observing the geo-electric resistivity in different geo-electric sections is calculated. The result shows that the effect caused by disturb current is determined by the type and parameters of geo-electric section, the distance from electrodes to disturb current and the depth of electrodes. The result of this article may be used as a reference when choosing the electric structure under stations, determining the depth of electrodes and escaping from disturb current.

Key words: Homogeneous medium of two horizontal layers; Geo-electric resistivity; Signal noise ratio; Fixed Schlinmberger array device; Electric potential difference

0 引言

我国地震地电阻率观测的定点台站普遍采用多 方位的对称四极电阻率观测装置,供电电极和测量 电极埋深一般为地下 1.5 m 左右,供电极距 \overline{AB} = 600~2~400 m,多数台站 \overline{AB} =1 200 m 左右。对于 不同的台址电性结构,在 \overline{AB} =1 200 m 的条件下, 其地下探测深度或探测范围为数百米或更深不 等^[1-3]。由于地电阻率对地下介质结构的不均匀性 反应敏感,且是多方位、大极距的地下介质体的体积

收稿日期:2010-09-19

基金项目:财政部行业专项分项目(200708017);科技部支撑计划子专题(2006BAC01B02-04-03);中国地震局兰州地震研究所论著 号:LC2012008

作者简介:解 滔(1986一),男(汉族),四川眉山人,硕士研究生,主要研究方向为地震电磁现象.

探测,在地电台网内或附近发生的大震、中等地震前 记录了突出的地电阻率中期~短临阶段的异 常^[3-12],且对台网内发生的一些强地震实施了中期 预测^[13]。许多震例研究表明,地电阻率方法是地震 监测预报的最有效方法之一。

近年来随着城市化进程、工农业和交通运输电 气化发展和生命线工程建设,地表大极距的地电阻 率观测其环境干扰日趋严重。这些干扰大致分为两 类:金属管网类干扰(包括金属管线、铁轨、高速公路 护栏、铁丝网、高压线路接地、灌溉渠道等)和游散电 流类干扰(包括测区工农业用电漏电、直流运输系统 干扰等)。目前来看,可选择两个途径抑制两类干 扰:一是按地电观测相关标准、规范[14-17]的要求远距 离避开干扰源,二是从观测技术入手抑制干扰影响。 关于后者,自上世纪 90 年代以来,在我国地电学科 的发展中已积累了大量有益的工作[18-22]。近年来, 实施了井下地电阻率观测实验,将供电、测量电极深 埋在地下钻孔中的一定深度以抑制地表干扰的影 响[24-26],同时也发展了小极距地电阻率观测。聂永 安等^[27-28]推导了水平 N 层均匀介质中点电源位于 地表和任意一层介质中时各层的电位分布表示式, 计算了三层介质模型下地电阻率井下观测对地表和 基岩电阻率变化的响应能力。参考上述研究,同时 考虑到地震地电阻率对地下大体积介质体积变化的 探测,本文仍立足于大极距观测装置,用水平两层均 匀介质近似地下介质,把对称四极观测装置的供电、 测量电极置于地表、地下不同深度,而把地表干扰电 流源置于地表距离观测装置中心 O 点不同距离,然 后分别计算干扰电流对不同深度电阻率观测的影 响。本文研究结果对井下电阻率观测实验中,在何 种台站电性结构下电极埋深有参考意义,有益于最 大程度的抑制地表干扰电流的影响,并减小投资费 用(电极埋深的钻孔费用)。

1 理论模型

设介质模型为两层水平均匀介质,如图 1 所示。 第一层介质的厚度为 h_1 ,电阻率为 ρ_1 ,第二层为半 无限介质,电阻率为 ρ_2 。A、B 为供电电极,与地表相 距 h_0 ;M、N 为测量电极,供电电极和测量电极可以 位于各自不同的深度。考虑三种情况下供电电流在 测量电极 M、N 间产生的电势差:①A、B 在地表供 电,M、N 在地表、第一层介质和第二层介质中时的 电势差;②A、B在第一层介质中时的电势差;③A、B 在 第二层介质中供电,M、N 在地表、第一层介质和第 二层介质中时的电势差。在四极装置下,测量电极 M、N 之间的电势差 ΔU_{MN} 如下:



图1 水平两层均匀介质中四极装置供电示意图

Fig. 1 Supply current on the surface of the homogeneous medium with two horizontal layers.

地电阻率计算公式为 $\rho_s = k \frac{\Delta U_{MN}}{I}$,其中电流强度 I 可以准确测量,供电电极和测量电极的位置固定,装置系数 k 也固定。当电极埋深变化时,装置系数也随之改变。

当测区有干扰电流输入时,干扰电流会在测量 电极 M_N 间产生附加电势差 $\Delta U'_{MN}$,并叠加在供 电电势差 ΔU_{MN} 上,进而影响到地电阻率测量。假 定干扰电流 I'从地表 C 点输入(图 1),得到干扰电 流 I'在 M_N 之间产生的干扰电势差

 $\Delta U'_{MN} = U(\overline{CM},z) - U(\overline{CN},z) \qquad (2)$ 根据 ΔU_{MN} 和 $\Delta U'_{MN}$ 可求得干扰电流产生的电势差 对供电电流产生的电势差的影响:

$$\epsilon = \Delta U'_{MN} / \Delta U_{MN} \tag{3}$$

2 干扰电流源影响计算

本文应用聂永安等^[27-28]推导出的电势分布表达 式计算干扰电流产生的电势差对供电电流产生的电 势差的影响 ε 。如图 1 所示,用 \overline{OA} 、 \overline{OB} 分别表示 O点与 A、B 在地表投影点的距离, \overline{OM} 、 \overline{ON} 分别表示 O 点与 M、N 在地表投影点的距离。 $\overline{OA} = \overline{OB} =$ $\overline{AB}/2 = L$, $\overline{OM} = \overline{ON} = \overline{MN}/2 = a$, $\overline{OC} = s$ 。给定介 质层参数 ρ_1 、 ρ_2 、 h_1 以及 h_0 、L、a、s、I、I',就可以计算 水平两层均匀介质模型中各种电极埋深情况下的 ε 随 ρ_2/ρ_1 、s 和深度 z 的变化。

2.1 ε 随 ρ_2/ρ_1 的变化

据绝大多数地电阻率台站观测装置参数,设装 置参数为:L=500 m; a=150 m。设干扰电流源参 数 s=400 m, I'=0.02I;台址电性层参数 $h_1=150$ m, $\rho_2/\rho_1 \in [10^{-5}, 10^5]$ 。计算结果绘图时横轴 ρ_2/ρ_1 采用对数坐标。

2.1.1 在地表供电时

在地表供电,取 $h_0 = 0$,测量电极 $M \setminus N$ 分别置 于z=0 m、100 m、250 m 深度时 ϵ 随 ρ_2/ρ_1 变化的 计算结果示于图 2。由图 2 可见, $\epsilon \sim \rho_2/\rho_1$ 有 4 个 特点:①在地表和第一、第二层介质中测量,ε随 ρ_2/ρ_1 增大是减小的,且在 $\rho_2/\rho_1 > 0.01$ 和 $\rho_2/\rho_1 < 10$ 的范围显著减小,在这个范围以外随ρ2/ρ1的减小或 增大趋于稳定值。显然,在 $\rho_2/\rho_1 > 10$ 地电断面中, 增大测量电极埋设深度没有多大意义。②ρ2/ρ1>1 (G型断面)的地电断面中的 ϵ 值比 $\rho_2/\rho_1 < 1$ (D型 断面)的断面中的 ε 值小,即地表供电时,无论在地 表还是在井下测量,两层断面情况下 $\rho_2 > \rho_1$ 的断面 比 ρ2 < ρ1 的断面克服地表干扰电流的效果好。特 别是在约 $\rho_2/\rho_1 < 0.1$ 的情况下,干扰电流 I'在地 表、第一层介质中的 M、N 之间引起的电势差干扰 已大于干扰电流比值 ϵ_1 (= I'/I),即 $\epsilon > \epsilon_1$ 。③在 ρ_2/ρ_1 相同的情况下,在地表和第一层介质中观测, 同一干扰电流测量所产生的影响差别不大,在第一 层介质中测量时比在地表测量略微小一些。④在第 二层介质中测量时,干扰电流产生的影响比在地表 和第一层介质中测量时小很多,同时有 ε<ε1。特别 是在 $\rho_2/\rho_1 \ge 1$ 的断面中 $\epsilon \approx \epsilon_1/2$,即干扰电势差比值 接近干扰电流比值的一半。





Fig. 2 The changes of ϵ versus ρ_2/ρ_1 change when supplying current on the surface.

2.1.2 在第一层介质中供电时

取图 1 中 $h_0 = 50$ m,测量电极 M, N 分别置于 z=0 m,30 m,100 m,250 m 深度时 ϵ 随 ρ_2/ρ_1 变化 的计算结果示于图 3。由图 3 得到 4 方面的认识: ①在地表和第一、第二层介质中测量, ϵ 随 ρ_2/ρ_1 的 变化大致与地表供电的情况类似。②在 $\rho_2/\rho_1 > 1$ 时,在地表和第一、第二层介质中测量 ε 与在地表供 电时大致相同。③在 $\rho_2/\rho_1 < 1$ 时,在地表和第一层 介质中测量 ε 比在地表供电时略大,且在 $\rho_2/\rho_1 <$ 0.01的情况下, ε 趋于相对较大的值比在地表供电 时大一些。④在第二层中测量, ε 与在地表供电时 的情况大致相同,比在地表、第一层中测量时的 ε 小 得多。总的来看,在第一层介质中供电,在地表和第 一、第二层介质中测量与在地表供电时相比不占优 势。



Fig. 3 The changes of ϵ versus ρ_2/ρ_1 change when supplying current in the first layer.

2.1.3 在第二层介质中供电时

在第二层介质中供电,取 $h_0 = 250$ m。图 4 分 别表示测量电极置于z=0 m、100 m、200 m、300 m 深度时的计算结果。由图可见,在第二层介质中供 电与在地表、第一层介质中供电的情况差别很大,表 现在 3 个方面:①在 $\rho_2/\rho_1 < 1$ 的地电断面中,在地





表和第一层中测量时干扰电流的影响很大,且 ϵ 随 ρ_2/ρ_1 的减小而迅速增大,在 $\rho_2/\rho_1 \rightarrow 0$ 时 $\epsilon \rightarrow \infty$ (图 中为了表示 ϵ 值较小的部分,未画出 $\epsilon > 0.1$ 的部 分)。②在地表和第一层中测量,约在 $\rho_2/\rho_1 > 10$ 时 ϵ 趋于稳定值,且干扰电流的影响小于干扰电流的 比值,即 $\epsilon < \epsilon_1$ 。③在第二层中测量, ϵ 随 ρ_2/ρ_1 值的 增加而减小,尤其是约 $\rho_2/\rho_1 > 1000$ 时, ϵ 趋于零,即 此时地表干扰电流产生的影响趋于零。由此可得到 以下认识:与在地表和第一层介质中供电相比较,如 果在地表和第一层介质中测量,则在第二层介质中 供电是不可取的,干扰电流的影响太大;在 ρ_2/ρ_1 值 很大的断面中,在第二层介质中供电和测量能使地 表干扰电流的影响减小到零,即 $\epsilon \rightarrow 0$ 。

2.2 ε随s的变化

在实际情况中干扰电流位置 C 和电流强度 I' 是不确定的,I'与 ϵ 是比例常数问题,而 C 点到 O 点 的距离 s 与 ϵ 的关系较复杂。文中分别计算了在地 表供电、测量和在第二层介质中供电、测量时 ϵ 随 s 的变化。设 C 点与对称四极观测装置在同一剖面 内(图 1),计算时参数设为:L=500 m;a=150 m;h₁ =150 m;z=0 m 和 200 m;I'=0.02I; $\rho_2/\rho_1=0.6$; 0 m $\leq s \leq 1500$ m。

2.2.1 地表供电、测量时

在地表供电,取 $h_0 = 0$,图 5(a)是在地表测量时 ε 随 s 的变化。为清楚表示 ε 值较小的部分,图中未 绘出在 150 m \leq s \leq 200 m 范围的 ε 值。由图可见, 约在 200 m<s \leq 300 m 的范围内 ε 衰减很快。计算 时注意到,s 接近于 150 m 时 ε 很大;s 接近 O 点时, ε \rightarrow 0。s \rightarrow 150 m 是干扰电流位置趋于测量极 M、N 位置,s \rightarrow 0 m 时干扰电流位置趋于 O 点。计算结果 中的 ε 吻合国家地震局科技监测司^[29]给出的在均 匀介质中的 ε。

2.2.2 在第二层介质中供电、测量时

在第二层介质中供电时取 $h_0 = 250$ m,图 5(b) 是在第二层介质中测量时 ϵ 随 s 的变化。同样为清 楚表示 ϵ 值较小的部分,图中未绘出在 150 m \leq s<200 m 范围的 ϵ 。由图可见,在 s 相同的情况下,在 第二层介质中供电、测量比在地表供电、测量其 ϵ 值 小得多,约在 s>800 m 范围 ϵ 已很小了,说明在第 二层介质中供电、测量对地表干扰电流的抑制能力 很强。如果在计算中取 $\rho_2/\rho_1 > 1$,在 s 大于一定距 离后 ϵ 会更小。计算时也注意到,s \rightarrow 150 m 和 s \rightarrow 0 m 时, ϵ 值类似地表供电、测量时的情形。这两种情 况是干扰电流接近井下测量极 M、N 和装置中心 O 点在地面的投影位置。



图5 在地表观测时 e 随 s 变化

Fig. 5 The changes of ϵ versus s when supplying current on surface and in the second layer

and measuring on the surface.

2.3 ε 随 z 的变化

计算了供电电极 A、B 置于地表和第二层介质 中时 ε 值随测量电极深度 z 的变化。计算中假定干 扰电流 C 点与对称四极观测装置在同一剖面内。 计算参数取:L=500 m;a=150 m; $h_1=150$ m;s=400 m;I'=0.02I; $\rho_2/\rho_1=0.1$ 和 10 以及 0 $\leq z \leq 500$ m。

2.3.1 地表供电时

在地表供电,取 $h_0 = 0$,图 6(a)是 ϵ 随 z 的变

化,在 $\rho_2 < \rho_1$ 和 $\rho_2 > \rho_1$ 两种断面中 ϵ 的变化是不同 的。在 $\rho_2 / \rho_1 = 10$ 时 ϵ 值小于 $\rho_2 / \rho_1 = 0.1$ 时的 ϵ 值; 在 $\rho_2 < \rho_1$ 的断面中,随 z 增大, ϵ 在第一层介质(z < 150 m)中衰减快,在第二层介质中(z > 150 m)衰减 慢;在 $\rho_2 > \rho_1$ 的断面中,随 z 增大, ϵ 在第一层介质 中衰减慢,在第二层介质中衰减快。说明测量电极 $M, N \in \rho_2 > \rho_1$ 的断面中随 z 增大更能减小表层干 扰电流的影响。

2.3.2 在第二层介质中供电时

在第二层介质中供电,取 h_0 =250 m。图 6(b) 是 ϵ 随深度 z 的变化。在两个断面中 ϵ 的变化与地 表供电测量的情况(图 6(a))类似,在第二层介质中 供电,在第一层介质中测量时 ϵ 比在地表供电大得



图6 在不同深度测量 2 时 ε 的变化

Fig. 6 The changes of ε versus z when supplying current on surface and in the second layer respectively and measuring at different depth z.

3 结论

(1)在点电源两层地电断面的地表和地下供电、测量的电势差计算中,地表干扰电流的影响量 有明显差异,影响量取决于地电断面类型和参数以 及供电电极、测量电极的埋深和避开干扰源的距离, 并不是深埋电极都能显著压制地表干扰电流源产生的干扰。

(2)固定供电电极和测量电极时,在 $\rho_2 > \rho_1$ 的 断面中观测时的 ϵ 值较在 $\rho_2 < \rho_1$ 的断面中观测的 ϵ 值小,说明 $\rho_2 > \rho_1$ 的断面更能抑制来自地表的干 扰。在 $\rho_2 / \rho_1 \approx 0.01 \sim 10$ 的范围内, ϵ 随着 ρ_2 / ρ_1 增 大而迅速减小,在此范围外 ϵ 值变化相对平缓。

(3)随着供电电极和测量电极的埋深的增加, ϵ 减小,这个现象在 $\rho_2 < \rho_1$ 的断面中比在 $\rho_2 > \rho_1$ 断面 中显著,特别是供电电极和测量电极深埋到第二层, 随测量电极埋深的增加, ϵ 将减小到很小。在 $\rho_2 < \rho_1$ 的断面中,供电电极深埋位于第二层, 而在地表、第 一层中测量是最不可取的。

(4) 在地表、第二层中供电和测量,地表干扰电 流位置离装置中心点超过一定距离后, ϵ 值很小,特 别在 $\rho_2 > \rho_1$ 的断面中供电和测量,干扰源超过一定 距离后 $\epsilon \rightarrow 0$;干扰源位置接近装置中心点时, $\epsilon \rightarrow 0$, 而干扰源位置接近测量电极 M, N 时, ϵ 很大。

[参考文献]

多,但是在第二层介质中测量时,在一定深度后 ε 比

在地表供电小得多。说明在第二层介质中供电测量

能更大程度的减小地表干扰电流的影响。

- [1] 武汉地质学院金属物探教研室编著.电法勘探教程[M].北京:
 地质出版社,1985:289-303.
- [2] 杜学彬,叶青,马占虎,等.强震附近电阻率对称四极观测的探测深度[J].地球物理学报,2008,51(6):1943-1949.
- [3] 钱家栋,陈有发,金安忠.地电阻率法在地震预报中的应用 [M].北京:地震出版社,1985:48-58.
- [4] 桂燮泰,关华平,戴经安.唐山、松潘地震前视电阻率短临异常 图像重现性[J].西北地震学报,1989,11(4):71-75.
- [5] 钱复业,赵玉林,刘婕,等. 唐山 7.8 级地震地电阻率临震功率 谱异常[J]. 地震,1990,(3):33-38.
- [6] 杜学彬. 地震预报中的两类视电阻率变化[J]. 中国科学(D 辑),2010,40(1):1-10.
- [7] 郑国磊,杜学彬,陈军营,等.断层构造对地震地电阻率异常的 影响[J].地震学报(待发表,2010).
- [8] 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组.一九七六年唐山地 震[M].北京:地震出版社,1982:1-70,184-200.
- [9] 肖武军,关华平. 汶川 8.0 级地震以及其它大震前的地电阻率 异常特征[J]. 西北地震学报,2009,31(4):349-354.
- [10] 魏焕,邓柏昌,于立业,等.中强地震前菏泽、郯城地震地电阻 率各向异性值变化特征[J].西北地震学报,2006,28(3);289-292.
- [11] 燕明芝,杨立明,梅秀苹.武威台地电阻率异常变化与映震效 果讨论[J].西北地震学报,2006,28(3),268-273.
- [12] 王福才,刘广宽,张骞,等.高邮台地电阻率异常与地震[J].西 北地震学报,2004,26(3);78-81.

(下转104页)

近的地区峰值加速度虽不太高,而随震中距的增加 衰减速率却较小。

在统计衰减关系时,我们注意到,在震级基本相同的情况下,距震中大致相同的个别观测点,峰值加速度的差别可能达一倍之多。引起这种差异的原因是多方面的,例如,震源机制、震源深度以及观测点相对于震中的方位、台基的场地条件等,观测条件的差别不但影响峰值加速度,而且记录波形的频率成分也有差别,通常场地土质越硬,优势频率越高,峰值加速度偏低。本文统计得到的甘肃南部地区地震动总体衰减的规律具有普遍性,但要得到陇南地区的地震动衰减的普遍规律尚需作进一步的研究。

[参考文献]

- [1] 唐丽华,李锰,王海涛.伽师一巴楚地区中强地震加速度衰减关系[J].西北地震学报,2007,29(4):377-379.
- [2] 李韬,马建新. 地震拟合相关系数在青海地区地震预报中的应 用[J]. 西北地震学报,2008,30(2):184-188.
- [3] 刘旭宙,姚凯,何新社,等. 2008 年 5 月 12 日汶川 M_s8.0 地震
 强震动记录与初步分析[J].西北地震学报,2008,30(3):266-269.
- [4] 闵祥仪,姚凯,何新社. 2003 年 10 月 25 日甘肃民乐一山丹 M_s6.1 地震强震近场纪录和分析[J]. 西北地震学报,2003,25 (4):289-292.
- [5] 姚凯,卢大伟,刘旭宙,等.利用汶川余震流动观测资料探讨地 形对峰值加速度的影响[J].西北地震学报,2009,31(1):46-50.

(上接22页)

- [13] 叶青,杜学彬,陈军营,等. 2003 年大姚和民乐一山丹地震 1 年尺度预测[J]. 地震研究,2005,28(3):226-230.
- [14] 中国地震局监测预报司.数字地震观测技术规范——电磁
 [S].北京:地震出版社,2001.
- [15] 钱家栋,顾左文,赵家骝,等. 地震台站观测环境技术要求电磁 观测[S]. 北京:地震出版社,2004.
- [16] 杜学彬,赵家骝,谭大诚,等.地电台站建设规范——地电阻率 台站[S].北京:地震出版社,2006.
- [17] 杜学彬,席继楼,谭大诚,等.地电台站建设规范——地电场台 站[S].北京:地震出版社,2006.
- [18] 钱复业,赵玉林,许同春.地电阻率季节干扰变化分析[J].地 震学报,1987,9(3);289-301.
- [19] 赵和云,钱家栋.地电阻率观测中的地表薄层影响与数学模拟 [J].地震,1986,(5):37-41.
- [20] 李艳东,赵家镏,庞丽娜.地电阻率多极距观测中的最佳布极 方式[J].地震 2004,24(2):17-24.
- [21] 田山,刘允秀,聂永安,等. 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[J]. 地震学

报,2009,31(3):272-281.

- [22] 金安忠,李言竹,李润贤,等.地电阻率观测中高压干扰场的研 究[J].地震学报,1990,12(4):422-433.
- [23] 赵家镏,李海亮,李建,等.用正向供电技术提高视电阻率观测 精度[J].西北地震学报,1996,18(2):31-36.
- [24] 刘昌谋,桂燮泰,柴剑勇,等.河源地电台全空间地电阻率试验 [J].华南地震,1994,14(3):40-45.
- [25] 刘允秀,吴国有,王蕃树,等.深埋电极地电阻率观测的实验结 果[A]//地震预测——地电方法论文集[G].福建:福建科学 技术出版社,1985.
- [26] 田山,郑文俊,张建新,等.大地电场观测深埋铅电极测量系统 试验[J].华北地震科学,2006,24(1):5-9.
- [27] 聂永安,巴振宁,聂瑶.深埋电极的地电阻率观测研究[J].地 震学报,2010,32(1):33-40.
- [28] 聂永安,姚兰予.成层半空间深埋电极产生的电位分布[J].中 国地震,2009,25(3):246-255.
- [29] 国家地震局科技监测司. 地震电磁观测技术[M]. 北京: 地震 出版社,1995:89-91.