

解滔、杜学彬、卢军,2016,井下视电阻率观测影响系数分析,中国地震,32(1),40~53。

井下视电阻率观测影响系数分析

解滔¹⁾ 杜学彬²⁾ 卢军¹⁾

1) 中国地震台网中心,北京市西城区三里河南横街 5 号 100045

2) 中国地震局兰州地震研究所,兰州 730000

摘要 采用水平层状均匀介质中点电流源位于任意深度时电位解析表达式,分析了井下对称四极视电阻率观测时影响系数随深度和极距的变化。结果表明对于固定的观测极距,影响系数与电极埋深之间关系复杂;对于某些电性结构和在一定深度范围内,井下观测对表层干扰具有放大作用。对于固定的电极埋深,小极距观测主要体现观测装置所在处的介质层信息,深部介质的影响系数随着极距的加大而增加,浅层影响系数一般先上升后下降;观测极距足够大时,井下观测影响系数逐渐接近于地表观测的影响系数,井下观测的优势得不到体现。本文以天水台为例讨论了实施井下观测时影响系数在选择供电极距和电极埋深过程中的应用。分析结果对在不同电性结构中实施井下地电观测时具有一定的参考意义。

关键词: 视电阻率 井下观测 影响系数 干扰 电性结构

[文章编号] 1001-4683(2016)01-0040-14 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

中国于 1966 年河北邢台 $M_s 7.2$ 地震后将物探视电阻率方法用于地震预测分析,此后由政府组织建设了大规模、长期连续监测的视电阻率观测台网。目前在中国主要活动断裂带和人口密集的大中城市附近的地震活动区共有 70 余个台站担负着常规的地震监测任务。在近 50 年的连续监测中多次记录到了发生在台网内的中强地震(如 1976 年唐山 $M_s 7.8$ 、松潘-平武 $M_s 7.2$ 、1998 年张北 $M_s 6.2$ 、2003 年大姚 $M_s 6.2$ 、民乐-山丹 $M_s 6.1$ 和 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 等地震)前突出的视电阻率异常(钱复业等,1982、1990; Lu et al, 1999; 桂燮泰等, 1989; 高立新等, 1999; 叶青等, 2005; 张学民等, 2009; 杜学彬, 2010), 且对其中的某些地震三要素实施了 1 年尺度的时间预测(叶青等, 2005)。

视电阻率观测要在地震监测预报中发挥作用离不开高质量的基础观测资料,但是,近年来随着经济的高速发展,部分台站受到了严重干扰进而影响了监测效能,台站数量从高峰期的近 120 个减少至目前的 70 余个,且现存台站中的许多台站也已受到干扰,使视电阻率观测受到严重影响。理论和观测实践表明,供电极距越大,地表环境变化对观测的影响越小。

[收稿日期] 2015-04-01; [修定日期] 2015-12-07

[项目类别] 国家自然科学基金(41374080)和地震科技星火计划(XH14001SX)共同资助

[作者简介] 解滔,男,1986 年生,助理研究员,主要从事地震电磁学及卫星热红外遥感应用研究。

E-mail: xtaolake@163.com

但是受观测场地的限制,将供电极距延长到可忽略地表干扰对观测影响的长度是难以实现的。为了抑制地表干扰,中国先后在郫县台(现成都)、山丹台和江宁台开展了多极距实验观测,以期从观测资料中分离出表层和地下不同深度介质的电阻率变化,从而抑制表层干扰(赵和云等,1987;钱家栋等,1988;薛顺章等,1994;王兰炜等,2011)。与此同时,自20世纪80年代陆续开展了一些井下视电阻率实验观测(将电极埋入地层一定深度)(王邦本等,1981;苏鸾声等,1982;刘允秀等,1985;刘昌谋等,1994;田山等,2009;康云生等,2013),实验结果表明井下观测能较好地抑制因浅层潜水升降和含水率季节性增减所引起的视电阻率变化以及来自地表的干扰,在供电极距相对较小的情况下可以获得可靠的深部介质电阻率变化信息。近年来随着观测环境日趋恶化,井下观测方法受到了重视,中国在8个台站进行了井下实验观测,已展开相关的理论研究(聂永安等,2009、2010;解滔等,2012a、2012b),并拟建若干个井下台站。

实施井下观测的目的在于抑制地表的干扰和捕捉孕震信息,二者缺一不可。井下地电观测投资大、且观测装置安装需一次性成功,观测极距和深度对井下观测的影响很大。但目前实验观测中的电极埋深、极距大小等是人为主观估计的,因而针对每一个台站特定的电性结构合理地选择电极埋深和观测极距是急需解决的问题。视电阻率观测影响系数理论表明,观测的视电阻率变化可以表述成测区不同区域介质电阻率变化的加权和(钱家栋等,1985、1998;Park et al,1991;Lu et al,2004),因此可依据不同观测极距和不同电极埋深时各区域介质对视电阻率的影响系数来评估井下观测对地表干扰的抑制能力和对深部岩层电阻率变化的响应能力。本文依据(聂永安等,2009、2010)给出的电位表达式,编写了可以计算 N 层水平层状均匀介质中各层介质影响系数随观测极距和电极埋深任意变化的程序。本文首先介绍视电阻率影响系数理论,然后以4层电性结构为例,简要讨论不同电性结构中中介影响系数因观测极距和电极埋深的不同而呈现的复杂分布,以说明依据电性结构合理选择极距和埋深的必要性。然后提出通过各层影响系数的大小来评估井下观测对地表及浅层干扰的抑制能力,并以天水台为例说明用此方法选择供电极距和电极埋深的过程,分析结果可为在不同电性结构中实施井下地电观测时选择电极埋深和供电极距提供参考。

1 视电阻率影响系数理论

中国定点视电阻率观测采用对称四极观测装置,一个台站一般布设2条相互垂直的测道或2条相互垂直加一条斜测道共3个测道,图1为观测装置示意图。如果将视电阻率测区划分为任意的 n 块区域,每一块区域介质电阻率为 ρ_i , $i=1,2,\dots,n$ 。在测区电性结构确定、观测装置和极距以及布极位置确定时,视电阻率 ρ_a 是各分区介质电阻率的函数(钱家栋等,1985、1998;Park et al,1991;Lu et al,2004)。

$$d(\ln\rho_a) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \ln\rho_a}{\partial \ln\rho_i} d(\ln\rho_i) \quad (1)$$

在多数情况下,各分区介质电阻率在一定时间内的相对变化非常小, $\Delta\rho_i/\rho_i \ll 1$,因此将式(1)作Taylor级数展开,二阶及高阶项远远小于一阶项,可忽略不计。视电阻率相对变化可以简单地表示为各分区介质电阻率相对变化的加权和,即

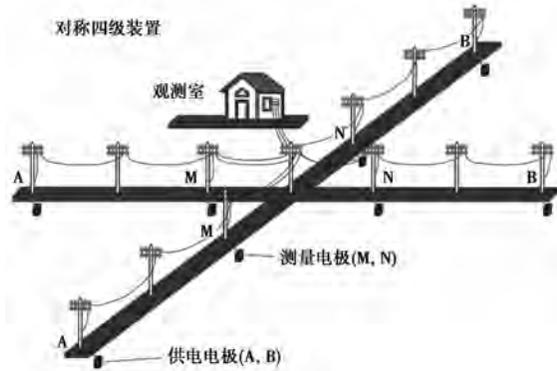


图1 对称四极观测装置示意图

$$\frac{\Delta \rho_a}{\rho_a} = \sum_{i=1}^n B_i \frac{\Delta \rho_i}{\rho_i} \quad (2)$$

式(2)中, B_i 被称之为影响系数, 其表达式为

$$B_i = \frac{\partial \ln \rho_a}{\partial \ln \rho_i} = \frac{\rho_i}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_i} \quad (3)$$

同时影响系数 B_i 满足如下关系 (Seigel, 1959; Roy et al, 1981; Wait, 1981), 即

$$\sum_{i=1}^N B_i = 1 \quad (4)$$

测区介质可以按任意大小划分, 用数值计算方法讨论各区域介质对视电阻率观测的三维影响系数。这里主要讨论各层介质整体对观测的影响, 因而按照 n 层水平层状结构将测区划分为水平层状的 n 块区域, 采用解析表达式和二极管装置滤波器算法计算对称四极装置的视电阻率和相应的影响系数 (姚文斌, 1989; O'Neill et al, 1984)。

采用编写的程序计算了 Lu 等 (1999) 文献中宝坻台电性结构在地表观测时的影响系数, 表 1 给出了 Lu 等 (1999) 和本文计算的在极距 $AB/2 = 500\text{m}$ 时的影响系数, 所得二者结果一致, 说明本文计算方法是准确的。

表 1 宝坻台影响系数对比

方法	B_1	B_2	B_3	B_4	ΣB_i
Lu 等 (1999)	0.005	0.018	0.849	0.128	1
本文	0.005	0.018	0.849	0.128	1

2 几类电性结构的影响系数分析

这里以 4 层水平层状均匀介质为例讨论介质影响系数在不同电性结构下的复杂分布。台站表层介质电阻率季节性变化显著, 主要表现为视电阻率的年变化。4 层电性结构有 8 种组合, 逐一讨论图件过多, 不失一般性的在分析过程中设定第 1 层介质电阻率不变, 就下面 3 层 H、K、A 和 Q 型 4 种结构讨论各层介质影响系数随深度和供电极距的变化, 同时也分析了同一地层模型中电极位于不同深度时的影响系数随供电极距的变化, 在所有的分析中都设定 4 个电极位于同一深度, 采用视电阻率对称四极观测装置。

2.1 KH 型结构

一维 KH 型电性结构参数如表 2 所示, 计算各层介质影响系数随深度变化时供电极距

$AB=300\text{m}$, $MN=100\text{m}$, 计算结果如图 2(a) 所示。在地表($H=0\text{m}$) 观测时第 2、3 层介质影响系数较大, 表层介质影响系数最小, 说明此时视电阻率变化主要反映中间两层介质电阻率变化。由地表至第 1、2 层分界面($H=10\text{m}$) 过程中第 1 层介质影响系数迅速减小, H 在第 2 层介质中增加时第 1 层介质影响系数则增加, 在约 $H=30\text{m}$ 时到达极值, 相当于表层的影响比埋深浅时加大, 与第 3、4 层介质影响系数相当, 随后随着电极深度增加, 影响系数迅速减小。在 H 增加过程中第 2 层介质影响系数整体呈下降变化, 第 4 层介质影响系数则呈上升变化, 第 3 层介质影响系数先增加而后迅速减小。在 H 约 200m 后第 4 层介质影响系数接近于 1, 占据主导地位。随着 H 的增加, 上面三层介质的影响系数迅速减小。

表 2 KH 型电性结构

层位	电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	厚度/m
1	40	10
2	80	40
3	30	80
4	120	∞

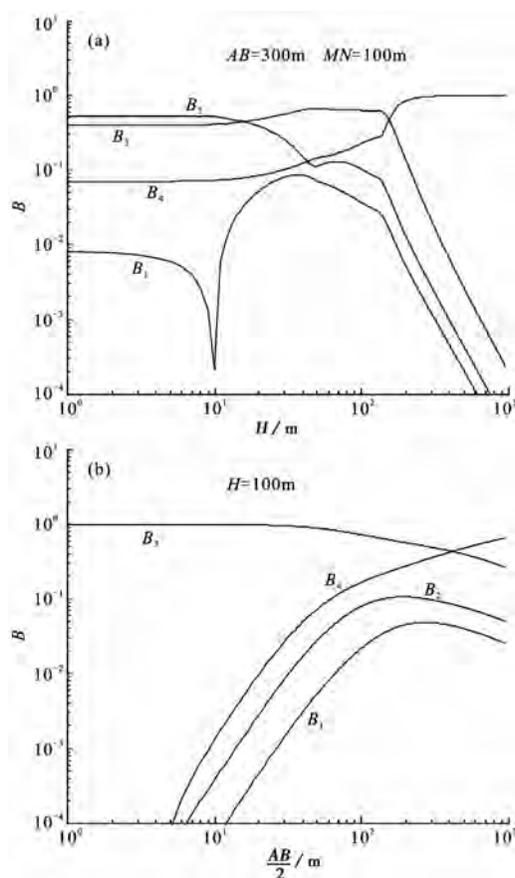


图 2 KH 型电性结构影响系数随深度的变化(a)及影响系数随观测极距的变化(b)

计算各层介质影响系数随观测极距变化时设定电极埋深 $H=100\text{m}$, 位于第 3 层介质中, 计算结果示于图 2(b)。观测极距较小时, 视电阻率主要反映第 3 层介质电阻率变化, 随着观测极距增加, 第 3 层介质影响系数逐步减小, 第 4 层介质影响系数增加, 第 1 层和第 2 层则是先增加后减小。尽管随着极距($AB/2$) 的进一步增加, 浅层介质影响系数趋于 0, 但各层影

响系数分布也与在地表观测时的影响系数的分布趋于一致,失去了井下观测的意义。

2.2 HK 型结构

一维 HK 型电性结构参数如表 3 所示,计算各层介质影响系数随深度变化时供电极距 $AB=300\text{m}$, $MN=100\text{m}$,计算结果示于图 3(a)。 H 从地表至第 2、3 层介质分界面 ($H=50\text{m}$) 过程中,各层介质影响系数几乎不变,第 1、4 层影响系数相当,接近 0.1,电极位于这一深度范围较易受浅层干扰影响。在深度进入第 3 层介质后,第 1、2 和 3 层影响系数减小,第 4 层则增加,在埋深 H 约 200m 后第 4 层介质影响系数占据主导地位。随着埋深增加,第 4 层影响系数接近于 1,上面 3 层介质影响系数则迅速减小。

表 3 HK 型电性结构

层位	电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	厚度/m
1	40	10
2	30	40
3	120	80
4	80	∞

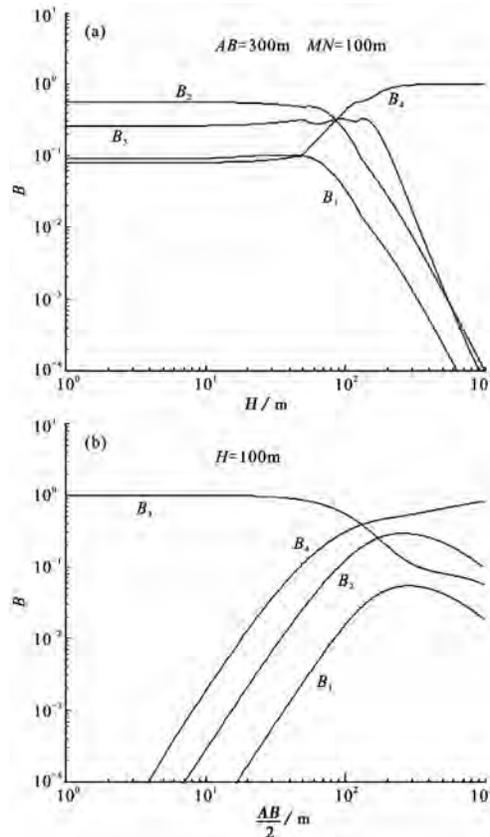


图 3 HK 型电性结构影响系数随深度的变化(a)和影响系数随观测极距的变化(b)

设定电极埋深 $H=100\text{m}$,计算各层介质影响系数随观测极距变化结果示于图 3(b)。各层介质影响系数变化形态与图 2(b)大体相近,小极距时观测装置所在层位影响系数占主导地位,随着观测极距增加,第 3 层影响系数减小、第 4 层增加,第 1、2 层先增加后减小。在极距较大时第 4 层介质影响系数占主导地位。

2.3 HA 型结构

一维 HA 型电性结构参数如表 4 所示,计算各层介质影响系数随深度变化时供电极距

$AB = 300\text{m}$, $MN = 100\text{m}$, 计算结果示于图 4(a)。各层介质影响系数随深度变化形态与图 3(a) 大体相同, 在电极埋深从地表至第 2、3 层介质分界面 ($H = 50\text{m}$) 过程中, 各层介质影响系数几乎不变, 第 1、4 层影响系数相当, 接近 0.1, 第 2 层最大, 第 3 层次之。在这一深度范围内观测, 较易受浅层电性结构变化干扰。在电极埋设深度进入第 3 层介质后, 第 1、2 和 3 层影响系数减小, 第 4 层则增加, 在埋深约 200m 后第 4 层介质影响系数趋于 1, 占据主导地位。随着埋深进一步增加, 上面三层影响系数迅速减小。

表 4 HA 型电性结构

层位	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	厚度/m
1	40	10
2	30	40
3	80	80
4	120	∞

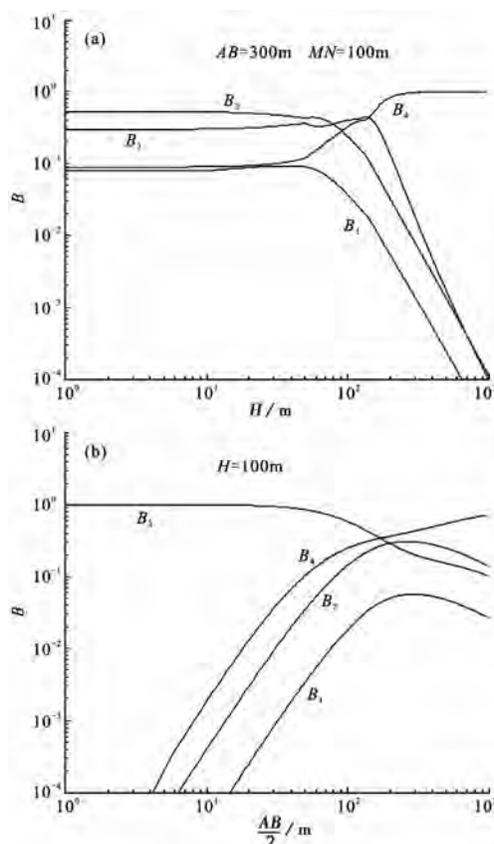


图 4 HA 型电性结构影响系数随深度的变化(a)及影响系数随观测极距的变化(b)

计算影响系数随观测极距变化时将电极深度设定为 $H = 100\text{m}$, 计算结果示于图 4(b)。电极位于第 3 层, 在极距较小时, 视电阻率观测主要反映这一层介质的变化, 其余各层影响系数很小。随着观测极距增加, 第 3 层影响系数减小, 第 4 层增加, 第 2、3 层则先增加后减小。在大极距阶段, 第 4 层影响系数最大。

2.4 KQ 型结构

一维 KQ 型电性结构如表 5 所示, 计算各层介质影响系数随深度变化时供电极距 $AB = 300\text{m}$, $MN = 100\text{m}$, 计算结果示于图 5(a)。电极埋深在第 1 层介质中变化时各层影响系数变化较小, 第 1 层介质影响系数约为 0.1, 第 2、3 层影响系数较大, 第 4 层最小。随着电极埋深

增加,第1、3层影响系数先增加后减小,第2层先减小后增加再减小,第4层则一直增加。在电极埋深100m之前,上面3层介质影响系数均较大,此时不能抑制浅层干扰。在埋深大于200m后,第4层影响系数占据主导地位并趋于1。随着埋深的增加,上面3层介质影响系数进一步减小。各层介质影响系数随观测极距变化示于图5(b),计算时电极埋深 $H=100\text{m}$ 。小极距观测时第3层介质影响系数接近于1,随着极距增加,其影响系数减小,第4层影响系数逐渐增加,第1、2层介质影响系数先增加后减小,在约 $AB/2>700\text{m}$ 后第1、2层影响系数相继出现负值(图5(b)中虚线所示)。在大极距阶段该型结构浅层介质影响系数小于前面分析的3类结构,此时对浅层干扰有较好的抑制作用。

表5 KQ型电性结构

层位	电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	厚度/m
1	40	10
2	120	40
3	80	80
4	30	∞

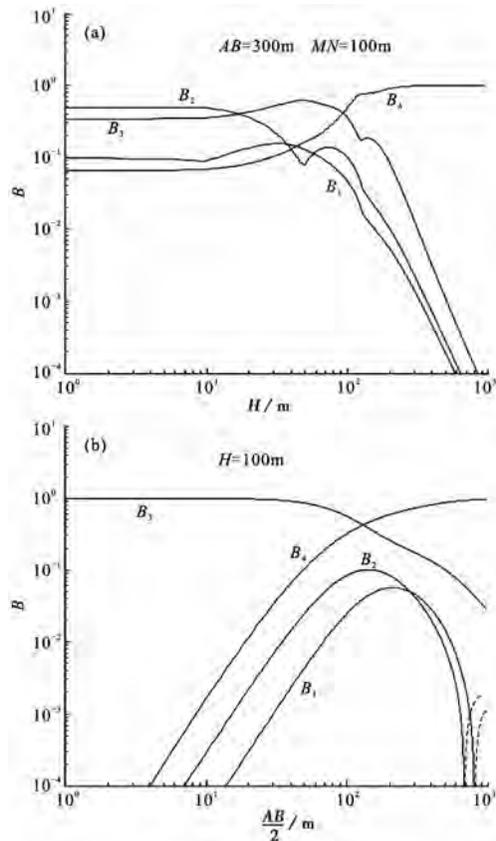


图5 KQ型电性结构影响系数随深度的变化(a)和影响系数随观测极距的变化(b)

2.5 电极埋深不同时影响系数随极距的变化

采用表2电性结构,电极位于地表($H=0\text{m}$)和100m时各层影响系数随观测极距变化分别示于图6(a)和6(b)。从图中可以看出,在地表观测时随着极距的增加,表层介质影响系数的变化表现为减小→增加(负值绝对值)→减小→增加→再减小的过程,第2、3层则是先增加后减小,第4层是逐步增加,各层介质先后依次占据主导地位。在观测极距约 $AB/2<400\text{m}$ 范围内,二者影响系数差异很大。观测极距较小时,地表观测浅层介质影响系数较大,

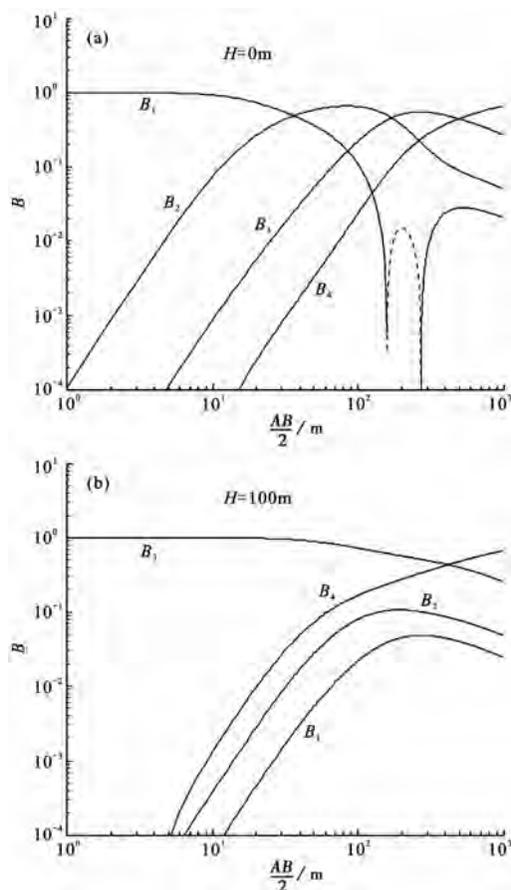


图 6 地表观测时影响系数随观测极距的变化(a)和井下 100m 深度观测时影响系数随观测极距的变化(b)

位于 100m 深度观测其影响系数则较小。在极距 $AB/2 > 400\text{m}$ 后二者影响系数值和变化形态大体相近,说明随着观测极距的增加,深埋电极观测的作用减弱。在这样一个电性结构下,如果按照目前井下实验观测人为主观地选定 $AB = 300\text{m}$ 和 $H = 100\text{m}$,井下观测表层影响系数大于地表观测,这样的井下观测系统对地表干扰的抑制作用不如地表观测。

对上述 4 类简单电性结构的分析可以看出,影响系数的分布十分复杂,对于更为复杂的电性结构,影响系数分布则更为复杂,采用统一的或人为主观给定的观测极距和电极埋深是不可取的。对于某些电性结构,在一定观测极距和电极埋深情况下,井下观测效果低于地表观测(图 6),因此依据测区电性结构合理地选择供电极距和埋深是非常必要的。视电阻率的异常变化体现的是观测装置主要探测范围内介质电阻率在孕震应力作用下的变化。地表浅部松散覆盖层对应力具有吸收作用,测区内浅层介质电阻率并不反映远场应力变化,而中、深层沉积层或基岩能有效传递应力,这部分介质电阻率能反映远场孕震应力的变化,因此视电阻率观测应当主要体现这部分信息。层状模型理论分析将各层介质内部电阻率视为一整体,任意小范围介质电阻率变化代表了整个层位电阻率变化,但是浅部岩层存在不均匀性,各区域介质电阻率变化同样呈现不均匀性,这就要求增加观测极距以加大探测范围,从而观测大体积范围内介质电阻率变化,避免“一孔之见”的情况。井下观测的目的在于抑制

地表干扰和尽可能多地捕捉与孕震有关的电阻率变化信息,二者同等重要。在资料受干扰小且变化平稳时,识别异常较为容易,单从这个角度而言,小极距装置且电极埋深大于供电极距 AB 时几乎可以忽略表层介质变化对观测的影响。但是小极距观测只是体现装置所在层位附近小体积范围内介质电阻率变化,不能有效反映对孕震应力传递更有效的深部岩层的信息,不利于孕震信息的获取,因此极距需要适当的增大。但是电极埋深固定时,随着供电极距的增加,井下观测的作用逐渐减弱并趋向于地表观测。因而在保证地表影响系数不变的情况下,增大供电极距则需要更大的电极埋深。就目前井下实验观测的工程投入和观测系统稳定性而言,电极埋深可接受范围在 250m 左右。对多数测区而言,这一深度已进入基岩内部。据全国视电阻率台站多年的观测数据,浅层介质影响系数绝对值低于 0.5% 左右的情况下观测值较为平稳,季节性年变化较小。随着电极埋深的增加,观测装置逐步远离地表浅层局部电性异常体,同时岩层也存在一定的屏蔽效应,视电阻率受地表的干扰将减小。因此确定井下视电阻率观测极距和电极埋深的原则是:在允许的埋深范围内使供电极距 AB 足够大,浅层影响系数足够小(如低于 0.5%),中、深层介质影响系数足够大。

3 天水台井下观测影响系数分析

3.1 天水台目前的井下观测

天水地电台建于 1970 年,台址位于天水市北道以南 11km 处。因 2009 年开始测区内物流中心、森林武警支队和林学院基建施工,观测环境遭受严重破坏,于 2010 年开始实施井下观测改造,有效观测资料始于 2012 年 1 月。井下观测采用对称四极装置,NS、EW 测道供电极距 $AB=300\text{m}$,测量极距 $MN=100\text{m}$,NE 测道供电极距 $AB=390\text{m}$,测量极距 $MN=130\text{m}$,电极埋深均为 $H=100\text{m}$,地表 ($H=4\text{m}$) 观测 NS 测道供电极距 $AB=1000\text{m}$,测量极距 $MN=333\text{m}$ 。地表 NS 测道 2004~2007 年资料和井下观测 NS 测道 2012~2014 年资料分别示于图 7(a) 和图 7(b)。春季降雨量开始增加、地表介质含水率增加、电阻率降低后地表视电阻率观测值上升。进入秋季后降雨量减小,地表介质电阻率上升,地表视电阻率观测值下降,表现出“夏高冬低”的反常年变形态(图 7(a))。井下视电阻率观测值年变形态则与地表观测的年变形态相反,表现为“夏低冬高”(图 7(b)),且地表观测年变幅度要大于井下观测年变幅度。

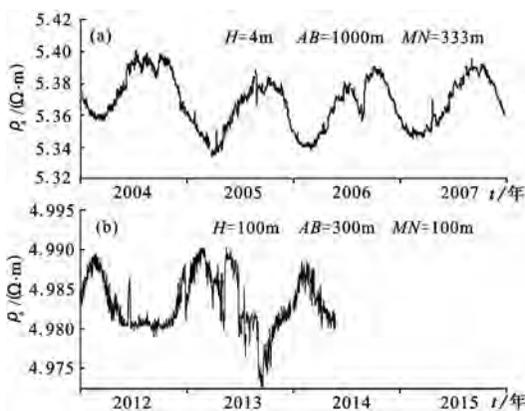


图 7 天水台地表观测视电阻率资料(a)及井下 100m 深度观测视电阻率资料(b)

天水台测区电测深曲线示于图 8(a),大致可视为 KH 型。依据该电测深曲线在水平层状均匀模型下反演的电性结构如图 8(a)所示,第 3 层为厚度较大的低阻层,且底层介质电阻率也很低。各层介质影响系数随深度变化如图 8(b)所示,由于第 3 层和底层低阻层的存在,电极埋深 $H=100\text{m}$ 时,第 1、2 层介质影响系数较小,低于 0.01,此时视电阻率观测值主要体现第 3 层介质电阻率变化,其次是第 4 层。在电极埋深增加的过程中,第 1、2 层介质影响系数相继有负值出现(图 8(b)中虚线部分)。

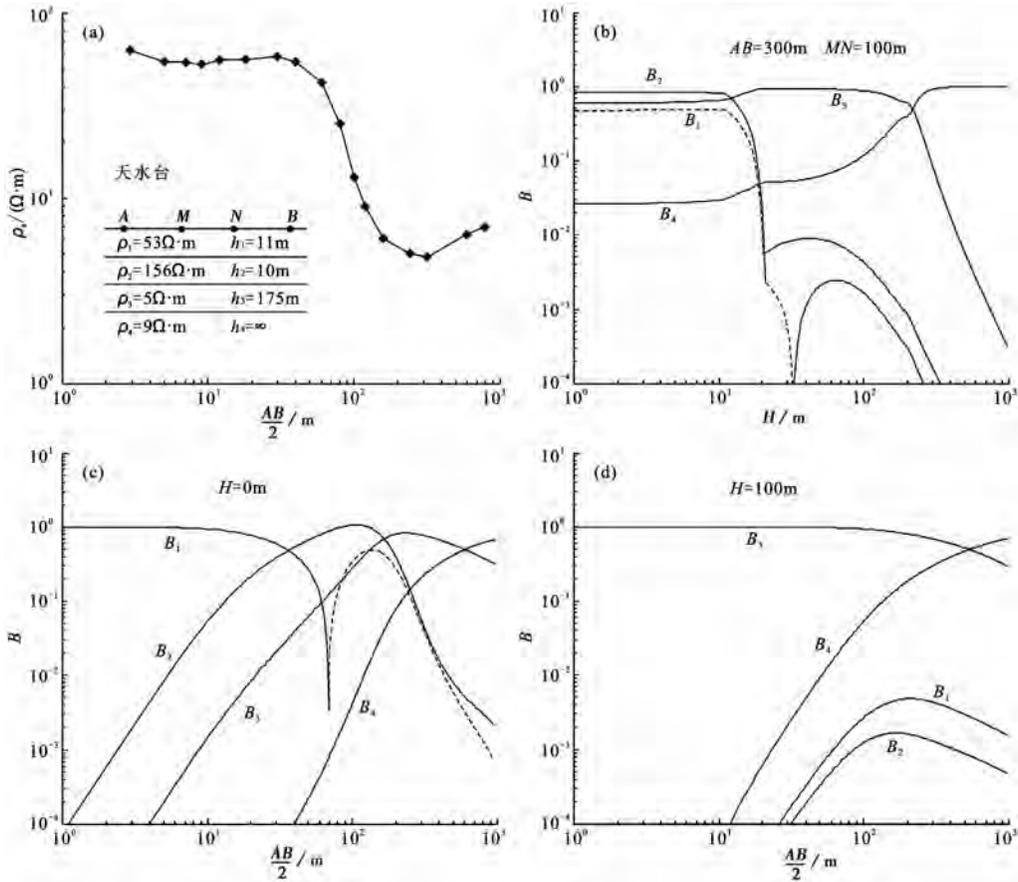


图 8 天水台电测深资料(a);天水台影响系数随深度的变化(b);地表观测时影响系数随观测极距的变化(c);井下观测时影响系数随观测极距的变化(d)

图 8(c)是地表($H=4\text{m}$)观测时各层介质影响系数随观测极距的变化,极距 $AB/2$ 超过 70m 后第 1 层介质影响系数出现负值(图 8(c)中虚线部分)。图 8(d)是在深度 $H=100\text{m}$ 观测时各层介质影响系数随观测极距的变化,电极位于低阻的第 3 层,极距较小时,视电阻率观测主要反映这一层介质的变化。随着观测极距增加,第 3 层影响系数有所减小,第 4 层增加较快,第 2、3 层则先增加后减小,但影响系数数值相对较小。在图 8(a)所示电性结构下,用 ρ_{as} 表示地表观测的视电阻率,则天水台视电阻率的相对变化值为

$$\frac{\Delta\rho_{as}}{\rho_{as}} = -0.0059 \frac{\Delta\rho_1}{\rho_1} + 0.0080 \frac{\Delta\rho_2}{\rho_2} + 0.5803 \frac{\Delta\rho_3}{\rho_3} + 0.4176 \frac{\Delta\rho_4}{\rho_4} \quad (5)$$

用 ρ_{aw} 表示井下视电阻率观测值, ρ_{aw} 的相对变化值为

$$\frac{\Delta\rho_{aw}}{\rho_{aw}} = 0.0043 \frac{\Delta\rho_1}{\rho_1} + 0.0016 \frac{\Delta\rho_2}{\rho_2} + 0.8769 \frac{\Delta\rho_3}{\rho_3} + 0.1172 \frac{\Delta\rho_4}{\rho_4} \quad (6)$$

研究表明,视电阻率年变化主要是由浅层介质电阻率季节性变化引起的。天水台地表观测时第1层介质影响系数为负(式(5)),因而在降雨量增加、第1层介质电阻率降低($\Delta\rho_1$ 为负)时视电阻率观测值 ρ_{as} 上升;降雨量减少、第1层介质电阻率升高($\Delta\rho_1$ 为正)时观测值 ρ_{as} 下降。井下观测时第1层介质影响系数为正(式(6)),因而年变形态与地表观测时相反。

天水台第3层为低阻层,且厚度较大,底层也为低阻层,从式(5)、式(6)可以看出第1层的影响系数很小。整体而言,天水台地表观测和井下观测的年变化幅度都较小,同时地表观测时第1层介质影响系数绝对值要大于井下观测时的影响系数,使得地表观测的年变幅度要大于井下观测。与地表观测相比较而言,井下观测第1、2层影响系数减小,说明井下观测对浅层介质电阻率变化干扰具有抑制作用。天水台井下观测第3层介质影响系数大于地表观测,第4层介质影响系数则小于地表观测。如果孕震作用主要引起底层介质电阻率变化,那么天水台现有小极距井下观测的映震能力不如地表原来的大极距观测,如果孕震作用主要引起第3层介质电阻率变化,则井下观测映震能力优于地表观测。但是整体而言,天水台井下观测受浅层干扰影响相对较小,便于资料分析和异常认定,因此综合认为井下观测效果要好于之前的地表观测。

3.2 对天水台井下观测设计的讨论

图9是采用图8(a)所示电性结构计算的各层介质影响系数随观测极距 AB 和电极埋设深度 H 的变化。在极距 $AB/2 = 150\text{m}$ 时,埋深100m以上第1层介质影响系数变化梯度较大,100m以下影响系数很小但变化较为平缓。第2层介质在小极距浅层观测时影响系数能达到1%左右,其余情况影响系数都很小。在计算的观测极距范围内,电极埋深在200m以内,第3层介质影响系数占主导地位,超过200m后第4层影响系数迅速增加并占主导地位。目前天水井下观测装置,第3层介质电阻率的变化对观测的影响最大。一般认为孕震应力主要引起深部介质电阻率发生变化,观测装置应兼顾反映深部介质的变化,因此在 AB 一定的情况下装置埋得越深越好。考虑到目前的井下观测技术,天水台观测装置兼顾第3层和第4层介质电阻率变化且适当加大极距较为适宜,从图9中可以看出,极距 $AB/2$ 取150~200m,埋深 H 取170~220m能满足需求。

4 讨论

井下观测的目的在于抑制地表干扰和突出由孕震引起的深部岩层介质电阻率变化。本文采用水平层状介质模型讨论各层介质的影响系数,分析结果表明:不同电性结构中实施井下观测,各层介质影响系数随电极埋深和极距的不同表现出复杂变化。观测极距固定时,影响系数并非都随着电极埋深增加呈现单调变化,某些深度范围内对地表干扰具有放大作用。但是只要观测深度足够深,总是可以抑制地表干扰、突出深部信息。观测装置埋深固定时,影响系数随观测极距变化也较复杂,小极距时对电极所在层位电阻率变化反映较大,随着极距增加,对深部信息的反映能力增加。观测极距足够大后,各层影响系数与地表观测时趋于相近,井下观测的作用越来越小。理想情况下观测极距越小、电极埋设越深,就越能避免表

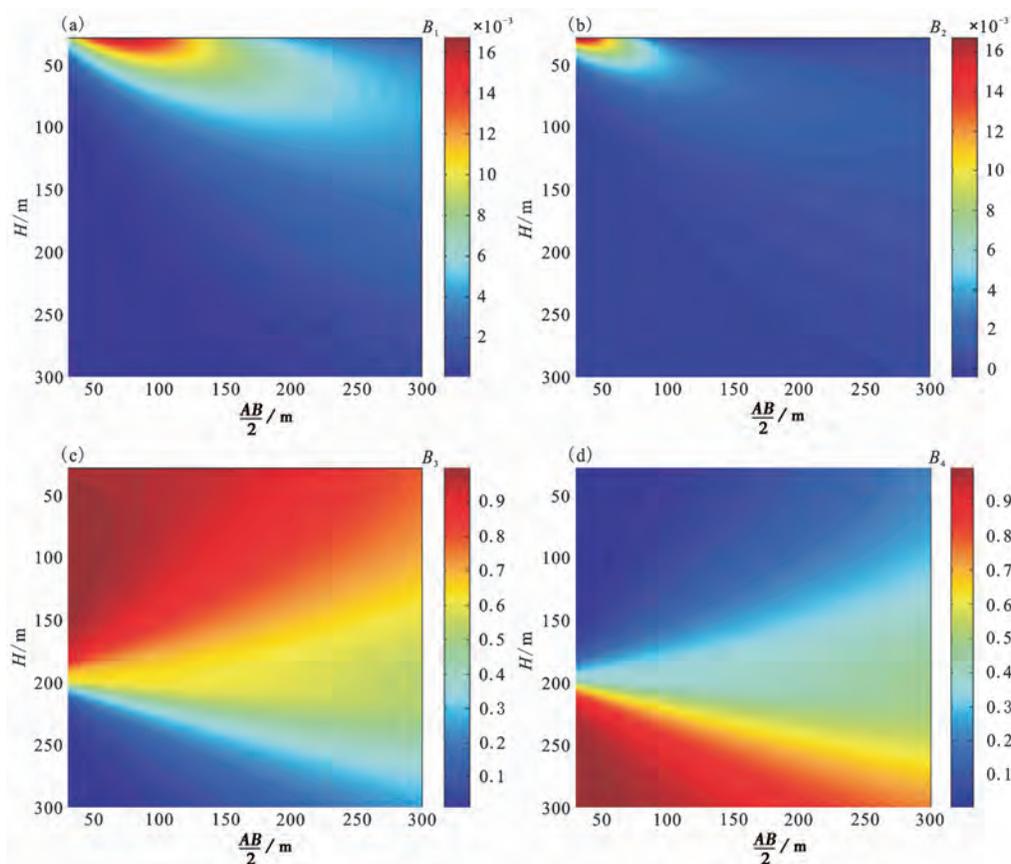


图9 天水台第1层介质影响系数随观测极距和埋深的变化(a);第2层介质影响系数随观测极距和埋深的变化(b);第3层介质影响系数随观测极距和埋深的变化(c);第4层介质影响系数随观测极距和埋深的变化(d)

层干扰和突出目标层介质电阻率变化。视电阻率观测值是一定体积内介质电阻率的综合反映,观测极距越大,观测值所反映的三维空间信息量就越大,反之则越小。各区域介质电阻率非均匀变化时,小极距观测可能会遗漏需要探测的信息,因此井下观测还是需要较大的观测极距。但随着极距的增加,与地表观测相比井下观测的作用就越小。井下观测电极埋设越深,投资越大,且电极埋设是一次性的,因此对每一个台站,依据地下电性结构合理地选择观测深度和尽可能大的极距既能抑制地表干扰又能监测深部、大体积范围的介质电性变化是非常重要的。

本文仅就天水台4层水平层状介质模型讨论了如何利用影响系数随电极埋深和观测极距的分布来选择合适的观测极距和电极埋深,对于其它台站也可以做同样的分析,为观测极距和电极埋深的选择提供依据。计算地层介质对视电阻率观测的影响系数,可以分析由表层介质电阻率季节性变化产生的视电阻率年变化,进而在实施井下观测时对其进行抑制。井下观测的意义在于:将电极深埋,使观测装置更接近需要探测的深部区域,一方面使观测装置远离地表干扰源,并且可以适当地减小观测极距,有利于抑制来自地表的干扰;另一方面更为直接地探测来自中深部的孕震信息。本文仅从一维影响系数的角度分析了井下视电

阻率观测对地表浅层季节性干扰影响的抑制能力,对于地表具体的局部电性异常体(例如金属管线、建筑物、蓄水设施和灌溉渠道开挖等),若要更为准确地评估其对观测的影响,应用三维影响系数分析或者建立三维模型进行数值评估更符合实际情况(解滔等,2013a、2013b、2014、2015)。

5 结论

通过分析4种层状电性结构各层介质影响系数随电极深度和观测极距的变化,发现影响系数的变化非常复杂。随着观测深度的增加,各层影响系数并非单调变化,在相同的观测极距下,电极埋设在一定深度范围内时对地表介质季节性干扰具有放大作用,但当电极埋设足够深之后总是能够有效抑制地表浅层干扰,突出深部介质电阻率变化信息。观测极距较小时,视电阻率主要反映装置所在层位介质电阻率变化,随着极距的增加,逐渐包含其他介质层信息。装置埋深一定时,随着观测极距的增加,井下观测各层影响系数逐渐接近于地表观测时的影响系数,井下观测的作用减弱。为尽可能地记录到与孕震有关的信息,观测极距不能太小。因此设计井下观测时需要结合台站实际的电性结构计算不同电极埋深和供电极距情况下的影响系数分布予以综合评估,结合现有经费和技术条件,在保证有效抑制地表干扰和获取深部信息的基础上选择合适的观测极距和装置埋设深度。

致谢:两位匿名审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,作者表示衷心的感谢。

参考文献

- 杜学彬,2010,地震预报中的两类视电阻率变化,中国科学:D辑,40(10),1321~1330。
- 高立新、黄根喜、阎海滨,1999,张北-尚义6.2级地震(1998-01-10)前倾斜与地电阻率前兆异常,地壳形变与地震,19(4),88~90。
- 桂燮泰、关华平、戴经安,1989,唐山、松潘地震前视电阻率短临异常图像重现性,西北地震学报,11(4),71~75。
- 康云生、安海静、马可兴等,2013,天水地电阻率地表与井下多种观测方式的试验分析,地震工程学报,35(1),190~195。
- 刘昌谋、桂燮泰、柴剑勇等,1994,河源地电台全空间地电阻率试验,华南地震,14(3),40~45。
- 刘允秀、吴国有、王蕃树等,1985,深埋电极地电阻率观测的实验结果,见:地震预测——地电方法论文集[C],206~216,福州:福建科学技术出版社。
- 聂永安、巴振宇、聂瑶,2010,深埋电极的地电阻率观测研究,地震学报,32(1),33~40。
- 聂永安、姚兰予,2009,成层半空间深埋电极产生的电位分布,中国地震,25(3),246~255。
- 钱复业、赵玉林、于谋明等,1982,地震前地电阻率异常变化,中国科学:B辑,(9),831~839。
- 钱复业、赵玉林、刘婕等,1990,唐山7.8级地震地电阻率临震功率谱异常,地震,10(3),33~38。
- 钱家栋、赵和云,1988,地电阻率的数值模拟和多极距观测系统,地震学报,10(1),77~89。
- 钱家栋、曹爱民,1998,1976年唐山7.8级地震地电阻率和地下水前兆综合物理机制研究,地震,18(增刊),1~9。
- 钱家栋、陈有发、金安忠,1985,地电阻率法在地震预报中的应用,北京:地震出版社。
- 苏鸾声、王邦本、夏良苗等,1982,井下电极观测地电阻率排除地面干扰的实验,地震学报,4(3),274~276。
- 田山、刘允秀、聂永安等,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。
- 王邦本、刘永兰、李验轩,1981,深井电阻率与地震预报,地震研究,4(1),378~403。
- 王兰炜、朱旭、朱涛等,2011,地电阻率多极距观测系统及实验研究,地震,31(1),20~31。
- 解滔、杜学彬、陈军营等,2012a,井下地电阻率观测中地表电流干扰影响计算,地球物理学进展,27(1),112~121。
- 解滔、杜学彬、郑国磊等,2012b,水平两层均匀介质中井下电阻率观测信噪比的理论计算,西北地震学报,34(1),18~22。
- 解滔、卢军、李美等,2013a,地理钢缆对宝昌台地电阻率干扰的定量分析,地球物理学进展,28(2),727~734。

- 解滔、卢军、任越霞等, 2013b, 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 地震前甘孜台地电阻率变化分析, 震灾防御技术, **8**(4), 377~388。
- 解滔、王洪岐、刘立波等, 2014, 四平台地电阻率相反年变有限元数值分析, 地球物理学进展, **29**(2), 588~594。
- 解滔、卢军, 2015, 地电阻率三维影响系数及其应用, 地震地质, **37**(4), 1~11。
- 薛顺章、温新民, 1994, 地电阻率预报地震新方法研究, 地震学报, **16**(2), 227~234。
- 姚文斌, 1989, 电测深数值计算和解释入门, 北京: 地震出版社。
- 叶青、杜学彬、陈军营等, 2005, 2003 年大姚和民乐-山丹地震 1 年尺度预测, 地震研究, **28**(3), 226~230。
- 张学民、李美、关华平, 2009, 汶川 8.0 级地震前的地电阻率异常分析, 地震, **29**(1), 108~115。
- 赵和云、钱家栋, 1987, 郫县台多极距观测资料的反演和分析, 中国地震, **3**(增刊), 73~78。
- Lu J, Qian F Y, Zhao Y L, 1999, Sensitivity analysis of the Schlumberger monitoring array: application to changes of resistivity prior to the 1976 earthquake in Tangshan, China, Tectonophysics, **307**(3~4), 397~405。
- Lu J, Xue S Z, Qian F Y, et al, 2004, Unexpected changes in resistivity monitoring for earthquakes of the Longmen Shan in Sichuan, China, with a fixed Schlumberger sounding array, PEPI, **145**(1~4), 87~97。
- O'Neill D J, Merrick N P, 1984, A digital linear filter for resistivity sounding with a generalized electrode array, Geophys Prospect, **32**(1), 105~123。
- Park S K, Van G P, 1991, Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes, Geophysics, **56**(7), 951~960。
- Roy A, Poddar M, 1981, A simple derivation of Seigel's time domain induced polarization formula, Geophys, Prospect, **29**(1), 432~437。
- Seigel H O, 1959, Mathematical formulation and type curves for induced polarization, Geophysics, **24**(3), 547~565。
- Wait J R, 1981, Towards a general theory of induced electrical polarization in geophysical exploration, IEEE Trans Geosci Remote Sensing GE, **19**(4), 231~234。

Sensitivity coefficients analysis of deep-well apparent resistivity measurement

Xie Tao¹⁾ Du Xuebin²⁾ Lu Jun¹⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

Abstract Analytical expression of electrical potential caused by a point current source in horizontally layered model was applied to analyze the distributions of sensitivity coefficients with the spacing and depth of electrodes when Schlumberger arrays were used in deep-well apparent resistivity measurement. The results showed that for a fixed Schlumberger array sensitivity coefficients displayed complex variations with the increase of electrode depth. Disturbances from surface might be amplified when deep-well measurement was made within some depth ranges for some electrical structures. For the fixed electrode depth, measurement using narrow electrode spacing mainly reflected resistivity information of the stratum where the arrays were. Information from deep stratum increased with the expansion of electrode spacing. Sensitivity coefficients of shallow layers generally increased at first and decreased afterward. When electrode spacing was large enough, difference of sensitivity coefficients between deep-well and surface measurement decreased. As an example, sensitivity coefficients of deep-well measurement at Tianshui seismic station were also analyzed. The calculated results could be used as a reference for choosing buried depth and spacing of the electrodes when deep-well configuration was used in different electric structures.

Key words: Apparent resistivity Deep-well measurement Sensitivity coefficient
Disturbance Electrical structure