

樊晓春、解滔、吴帆等,2019,井下地电阻率观测影响系数分析——以江宁地震台为例,中国地震,35(2),347~358.

井下地电阻率观测影响系数分析 ——以江宁地震台为例

樊晓春¹⁾ 解滔²⁾ 吴帆¹⁾ 袁慎杰¹⁾

1)南京市地震监测预警中心,南京 210008

2)中国地震台网中心,北京 100045

摘要 采用水平层状均匀介质中点电源位于任意深度时的电位解析表达式,以江宁台 3 层电性结构为例,分析了井下对称四极地电阻率观测时各层影响系数随深度、极距的变化,并结合探测深度探讨了实施井下观测时影响系数在选择供电极距和电极埋深时的作用。结果表明,对于“K”型电性结构,江宁台井下观测对地表、浅层干扰有较强的抑制作用,其短极距观测对地表、浅层干扰的抑制能力显著优于长极距观测;长极距观测在电极埋深 H 小于 100m 时对地表介质季节性的干扰具有放大作用;浅层影响系数一定时,电极埋深和供电极距需同时增加;江宁台井下观测供电极距 $AB/2$ 取 100~150m、电极埋深 H 为 250m 较为合理。

关键词: 地电阻率 井下观测 影响系数 探测深度 电性结构

[文章编号] 1001-4683(2019)02-0347-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地电阻率前兆观测是从物探地电阻率方法移植而来的,1966 年邢台 $M_s7.2$ 地震后开始用于地震预测分析。在 50 多年来的连续监测中多次记录到了中强地震震前明显的视电阻率异常,特别是唐山 $M_s7.8$ 、汶川 $M_s8.0$ 地震前的异常变化是前兆观测对应地震的经典范例(钱复业等,1998;钱家栋等,2013)。随着城市化进程加快和轨道交通的大规模发展,相当一部分地电阻率观测台站的观测环境受到严重影响,台站数已减少至 70 余个。影响地电阻率观测的因素主要包括测区内金属管线、漏电电流及年变的干扰等(张世中等,2013;解滔等,2013、2014;张宇等,2016;王同利等,2017;沈红会等,2017;樊晓春等,2018a),其中尤其是轨道交通运行中产生的漏电电流会使地表长极距、多方位的地电阻率观测信噪比降低,以至于无法分析小的变化,如江宁地电台(简称江宁台)的情况。由于井下观测有助于减轻地表干扰,因而成为缓解地震观测环境保护与地方经济发展之间矛盾的重要手段。井下地电阻率观测实验始于 20 世纪 80 年代,但由于缺乏相关理论,对于不同实验地区由地下电性结构差异所导致的实验结果差异很大的问题难以给出解释和建议,故对实验结果的分析难以深入,

[收稿日期] 2018-09-18; [修定日期] 2018-12-06

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划项目(XH19015YSX)资助

[作者简介] 樊晓春,男,1984 年生,工程师,主要从事地震监测预报及台网管理工作。E-mail:fanxiaochungis@163.com

早期建设的 12 个井下地电阻率观测台站仅剩广东河源台仍用于观测。目前,有关井下观测相关理论的研究已取得较多结果,聂永安等(2009、2010)通过求得水平层状均匀介质中点电流源位于任意深度时的电位解析表达式,研究了 3 层结构的地表、井下四级对称电阻率观测结果与电极埋深、供电极距之间的关系;解滔等(2012a、2012b、2015、2016)采用该电位解析表达式分析了井下四级对称电阻率观测时一维、三维影响系数随深度和极距的变化,并对井下地电阻率观测中地表电流的干扰影响进行了计算;毛先进等(2014、2017)采用边界积分方程法计算了下伏高阻、下伏低阻影响系数随电极埋深和供电极距的变化,并计算了不同电极埋设时井下观测的探测深度变化;王兰炜等(2014)提出了井下地电阻率观测在不同装置情况下装置系数的计算方法;沈红会等(2014)研究了在抑制地铁等表层干扰、提高信噪比时选择极距和电极埋深的合理方案。

2008 年起,河北大柏舍台、甘肃天水台与平凉台、陕西合阳台、广东河源台、浙江长兴台、江苏海安台与江宁台等实施了井下 34~225m 深的地电阻率实验观测,并对装置及观测数据开展了相关分析(杨兴悦等,2012;康云生等,2013;许忠祥等,2014;王兰炜等,2015;刘君等,2015;赵斐等,2018;樊晓春等,2018b)。根据《井下地电阻率观测技术指导意见》^①讨论稿,目前井下实验观测中电极埋深、极距符合要求的台站较少,由于缺少相应的技术规范指导,这些台站观测装置系统的建设基本是各自设计的,缺少必要的科学性和合理性。视电阻率观测影响系数理论表明,观测的视电阻率变化可被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),因此可以通过不同的观测极距、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或地表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(解滔等,2016)。江宁台符合《井下地电阻率观测技术指导意见》^①相关规范,为我国首个 200m 井深的台站且井下观测极距最长达 1000m,通过计算其影响系数来综合评估江宁台观测系统,尤其是井下长极距、短极距观测对地表干扰的抑制能力具有一定的意义。本文依据聂永安等(2009、2010)、解滔等(2016)给出的电位表达式及程序,以江宁台 3 层电性结构为例,计算了江宁台 3 层水平层状均匀介质中观测极距和电极埋深变化时各层介质的影响系数,并通过各层介质影响系数的大小评估了江宁台地表、井下观测对地表、浅层干扰的抑制能力,解释了各测道观测数据的年变化幅度差异问题,进而结合《井下地电阻率观测技术指导意见》^①中的要求提出了较理想的观测极距和电极埋深方案,分析结果可以为类似电性结构中实施井下地电阻率观测提供参考。

1 江宁台简介

江宁台始建于 1978 年,因城市建设,先后于 1994、2003 年 2 次搬迁观测场地,现位于南京市江宁区水荆墅村,测区为基本农田保护区,周围地形开阔平坦,地形高差不超过 2m,地貌属秦淮河冲积平原。测区构造单元为溧水中生代火山岩盆地,位于 F_1 南京-湖熟断裂南西盘和 F_4 方山-小丹阳断裂西盘的楔形地块上,东距茅山断裂带 30km,西北距长江 36km。地表地电阻率观测始于 2004 年 4 月,采用 ZD8BI 型地电仪。2015 年 11 月开始井下地电阻率观测,采用 ZD8BI 型地电仪,该仪器为目前国内布设最深的地电阻率观测装置。地表和井

^① 王兰炜等,2017,井下地电阻率观测技术指导意见

下相互独立观测,均采用四极对称观测方式,布极呈“十”字状(图 1)。供电极、测量极布设情况和装置系数见表 1。

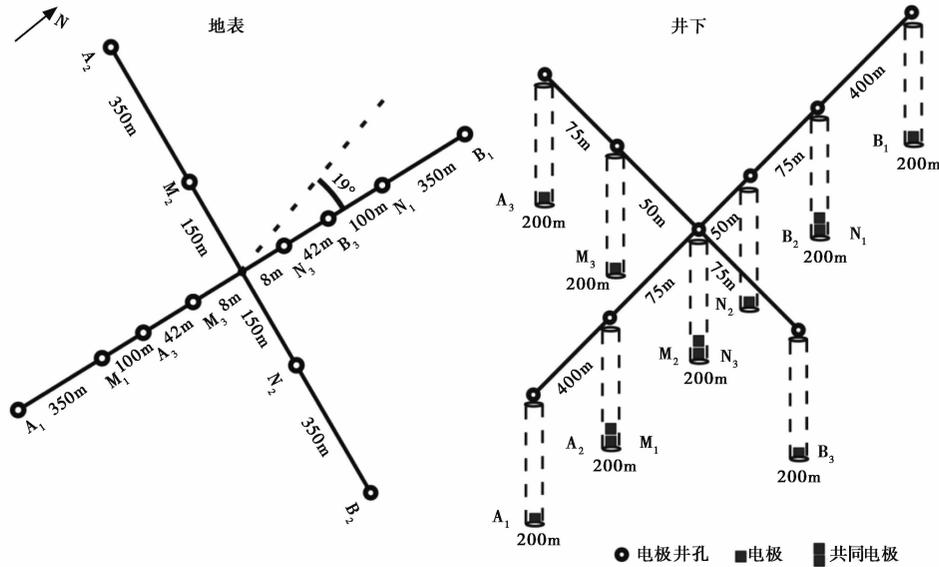


图 1 江宁台地表、井下地电阻率观测布极

表 1 供电极、测量极布设情况和装置系数

布设位置	电极埋深 H/m	供电极距 AB/m	测量极距 MN/m	方向	装置系数 K
地表	3	1000	300	NS	2382.4
		1000	300	EW	2382.4
		100	16	NE	478.3
深井	200	1000	200	NS	5151
		200	50	NS	1172
		200	50	EW	1275

2 地电阻率影响系数理论

江宁台井下地电阻率观测采用对称四极观测装置,井下水平正交布设。根据视电阻率影响系数的计算方法可知,台站观测到的地电阻率变化为测区不同区域介质地电阻率变化的加权和,因此,结合台站实际的电性结构,可以依据不同电极埋深、供电极距情况下的影响系数分布来综合评估江宁台井下观测对浅层干扰的抑制能力和对深部岩层介质电阻率变化的响应能力。如果将电阻率测区划分为任意的 n 块区域,则每块区域介质电阻率为 ρ_i ($i = 1, 2, \dots, n$)。在测区电性结构、布极位置及观测装置确定时,视电阻率 ρ_a 为各分区介质电阻率的函数(钱家栋等,1985)

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

通常各分区介质电阻率在一定时间内的相对变化非常小,即 $\Delta \rho_i / \rho_i \ll 1$, 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

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

B_i 为影响系数,满足 $\sum_{i=1}^N B_i = 1$, 其表达式为

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

测区介质按任意大小划分,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。本文主要讨论各层介质整体对观测的影响,因此按照 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级装置的奥尼尔滤波器(O'Neill36)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;聂永安等,2009、2010)。

3 井下地电阻率观测影响系数分析

3.1 地电阻率年变化幅度及特征

选取江宁台地电阻率地表观测 2005~2017 年、井下观测 2016~2017 年资料,其中,井下观测 NS 测向(AB=200m;MN=50m)因人工电位差较大而溢出,这导致 2016 年观测数据出现 3 次台阶,因此仅计算 2017 年的数据;地表观测 NS 测向(AB=1000m;MN=300m)受蔬菜大棚的干扰影响较严重(樊晓春等,2018a),故将 2013 年 5 月、2014 年 8 月及 2015 年 9 月由蔬菜大棚建设引起的长趋势性变化进行数据处理(图 2)。由图 2 可见,江宁台地电测区表层介质电阻率的季节性变化显著,表现为视电阻率的年变化,表明地表、井下观测随夏季降雨量的增加,表层介质含水率升高,地表介质电阻率降低,故引起视电阻率观测值降低;而冬季降水量减少,表层介质电阻率上升,视电阻率观测值升高。因此,地表、井下观测地电阻率均表现出“夏低冬高”的正常年变形态。

计算地表、井下观测地电阻率数据的年变幅度(图 3)。由图 3 可见,地表 NS 测向(AB=100m;MN=16m)观测的地电阻率年变化幅度较大,表明短极距受表层介质的影响较大,地表 NS 测向(AB=1000m;MN=300m)年变化幅度显著大于地表 EW 测向(AB=1000m;MN=300m),2013、2015 年地表 NS、EW 测向(AB=1000m;MN=300m)同步出现年变化幅度下降,这可能与测区周围应力场的压性、张性变化有关。井下 NS、EW 测向(AB=200m;MN=50m)的年变化幅度较地表观测显著减小,表明井下短极距观测受表层介质的影响很小,且前者年变化幅度显著大于后者(表 2)。井下 NS 测向(AB=1000m;MN=200m)年变化幅度小于地表 NS 测向(AB=1000m;MN=300m),说明电极埋深至 200m 后,有效降低了表层介质的影响,使其年变化幅度减小。总体来说,由于江宁台井下观测电极埋深达 200m,因而较好地抑制了地表杂散电流,显著减少了观测数据的年变化幅度,比较地表 NS 测向(AB=1000m;MN=300m)和井下 NS 测向(AB=1000m;MN=200m)的年变化幅度,说明极距相近的情况下,深埋电极可以降低年变化幅度。另外,如表 2 所示,地表 NS 测向(AB=1000m;MN=300m)的年变化幅度为地表 EW 测向(AB=1000m;MN=300m)的 2 倍左右,而井下 NS 测向(AB=200m;MN=50m)的年变化幅度同样为井下 EW 测向(AB=200m;MN=50m)的 2 倍左

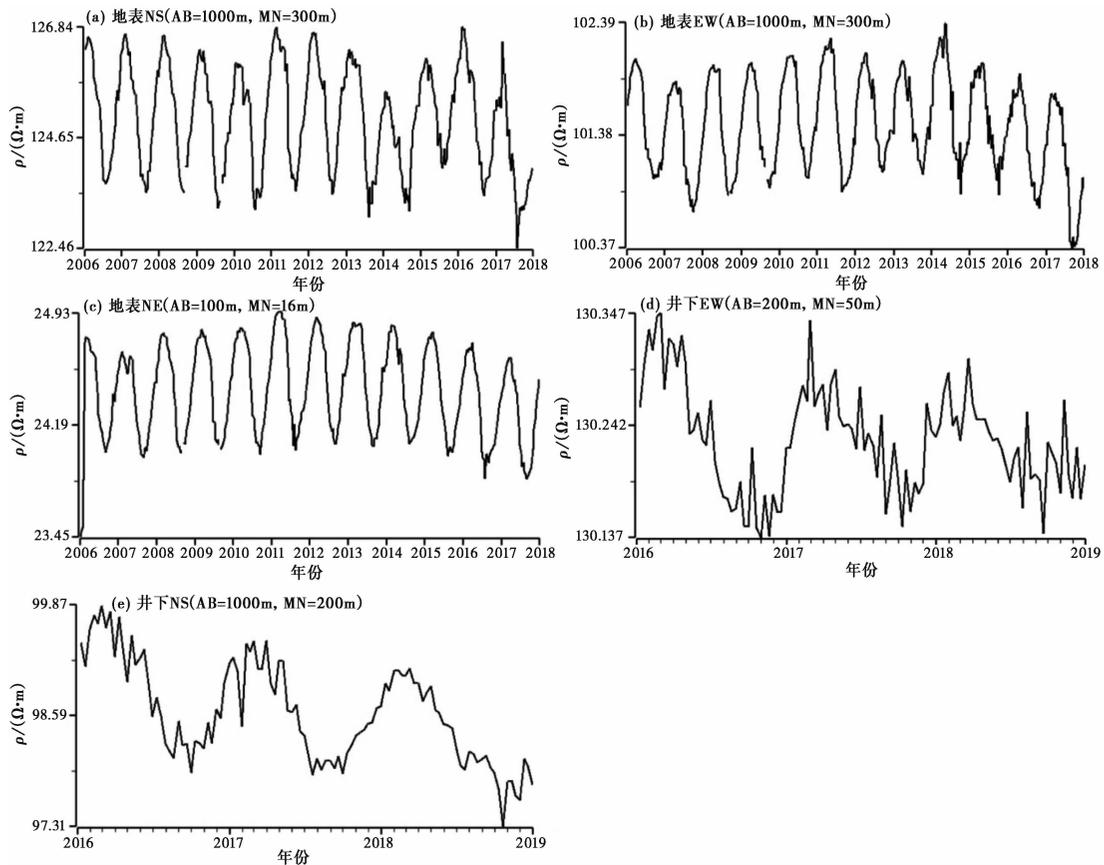


图 2 江宁台地表、井下观测地电阻率旬均值

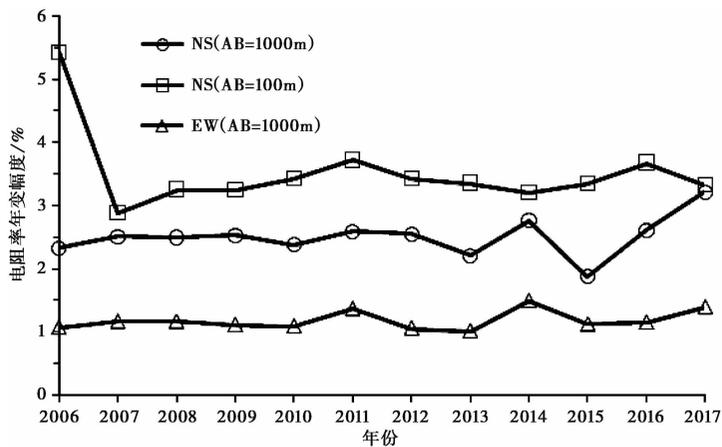


图 3 江宁台地表观测地电阻率年变幅度

右,这可能与测区的电性结构有关,需要通过各层介质的影响系数来具体分析原因。

3.2 影响系数分析

江宁台测区的高密度电法探测和电测深报告的 NW-SE、NS 测向结果表明,观测区域的

表 2 江宁台地电阻率观测数据年变幅度

年份	地表地电阻率年变幅度/%			深井地电阻率年变幅度/%		
	NS 测向 (AB = 1000m)	EW 测向 (AB = 1000m)	NE 测向 (AB = 100m)	NS 测向 (AB = 1000m)	NS 测向 (AB = 200m)	EW 测向 (AB = 200m)
2016	2.6700	1.1444	3.6718	1.9542	—	0.1617
2017	3.2927	1.3804	3.3151	1.5746	0.3358	0.1507

2 条电测深曲线均具有“K”型特征,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见表 3。由表 3 可见,电性结构等效为 3 层,第 2 层为厚度较大的高阻层,在深度小于 230m 的 2 个测向

表 3 江宁台电测深曲线反演的电性结构

NW-SE 测向		NS 测向	
层厚/m	电阻率/($\Omega \cdot m$)	层厚/m	电阻率/($\Omega \cdot m$)
30	36.29	30	18.45
230	144.52	230	335.67
∞	140.39	∞	80.58

分层厚度、各层电阻率分层参数一致,随着深度的增加,电阻率逐步减小。本文以江宁台 3 层水平层状均匀介质讨论各层介质影响系数随电极埋深、观测极距的变化以及同一地层模型中电极位于不同深度时影响系数随供电极距的变化。

图 4(a)为井下 NS 测向(AB = 1000m; MN = 200m)观测时各层介质影响系数随电极深度的变化曲线。由图 4(a)可见,当电极埋深 H 较小时,第 2 层介质影响系数较大,说明此时视电阻率的变化主要反映中间层介质电阻率的变化,第 3 层介质影响系数略大于第 1 层介质影响系数。由地表至第 1、2 层分界面即 $H = 30m$ 时,第 2 层介质影响系数开始减小,第 1、3 层介质影响系数开始增大。当电极埋深 $H = 130m$ 时,第 3 层介质影响系数大于第 2 层介质,第 1 层介质影响系数迅速下降。当电极埋深 $H = 200m$ 时,视电阻率的变化主要体现底层介质电阻率的变化,其次是第 2 层的变化。当电极埋深继续增加时,第 1、2 层介质影响系数迅速减小,而底层介质影响系数占据主导地位,趋近于 1。表明各层介质影响系数并非都随着电极埋深的增加而呈现单调变化,井下 NS 测向(AB = 1000m; MN = 200m)观测在井深 30 ~ 100m 时对地表干扰具有放大作用,井深大于 100m 后,电极埋设越深,就越能抑制地表干扰和突出目标层介质电阻率的变化。另外,由图 4(a)还可见,井下 NS 测向(AB = 1000m; MN = 200m)观测电极埋设越深,则 B_1 越小,因此从抑制浅层地表干扰能力方面来说,200m 并不是最佳的电极埋设深度。当电极埋设深度大于 900m 时, B_1 才会小于 0.5%,从而达到较好地抑制浅层地表干扰的能力。

图 4(b)为井下 NS、EW 测向(AB = 200m; MN = 50m)观测时各层介质影响系数随电极埋设深度的变化曲线。由图 4(b)可见,当电极埋深 H 较小时,第 1、2 层介质影响系数较大,此时视电阻率的变化主要反映了表层、中间层介质电阻率的变化。当电极埋深 $H = 200m$ 时,视电阻率的变化主要体现中间层介质电阻率的变化。随着电极埋设深度的增加,底层介质影响系数占据主导地位,趋近于 1。表明井下短极距观测时电极埋设越深,对地表干扰的抑制能力越好,同时还表明井下观测时只要观测位置足够深,就可以抑制地表干扰,突出深部信息。

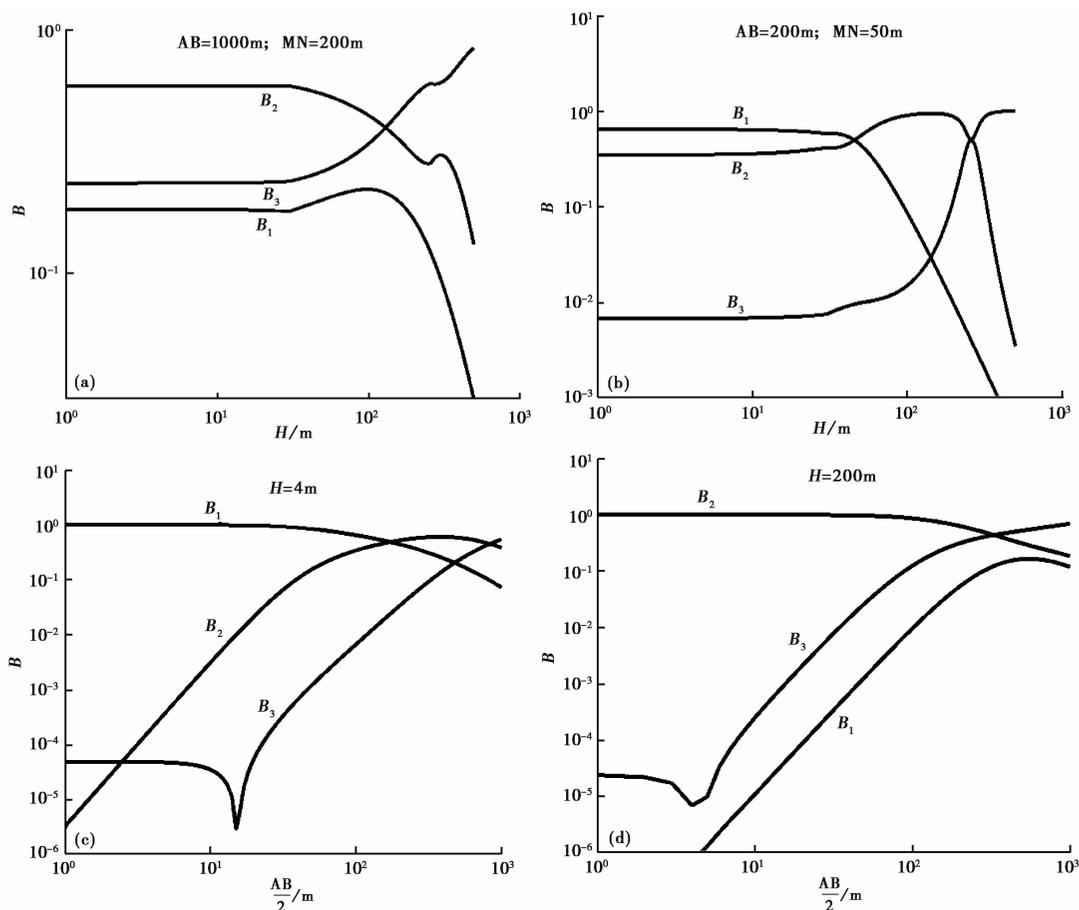


图 4 江宁台影响系数分析

(a) 井下长极距观测影响系数随电极埋设深度的变化；(b) 井下短极距观测影响系数随电极埋设深度的变化；(c) 地表观测影响系数随观测极距的变化；(d) 井下观测时影响系数随观测极距的变化

图 4(c) 为地表 $H = 4\text{m}$ 时各层介质影响系数随观测极距的变化。由图 4(c) 可见, 当 $AB/2$ 较小时, 第 1 层介质影响系数较大, 此时视电阻率变化主要反映了表层介质电阻率的变化; 当 $AB/2 > 170\text{m}$ 时, 第 2 层介质影响系数大于第 1 层; 随着 $AB/2$ 逐渐增大, 第 3 层介质影响系数逐渐增加, 第 1、2 层减小。

图 4(d) 为电极埋深 $H = 200\text{m}$ 时各层介质影响系数随观测极距的变化。由图 4(d) 可见, 电极位于第 2 层。当 $AB/2 < 100\text{m}$ 时介质影响系数对电极所在层位电阻率的变化反映较突出, 主要反映了第 2 层介质电阻率的变化, 对深部信息的反映能力逐渐增强, 但同时地表干扰的抑制能力也有所降低。如图 4(c)、4(d) 所示, 当 $AB/2 > 400\text{m}$ 时, 地表、井下观测的影响系数值和变化形态相近; 当观测极距足够大时, 各层介质影响系数与地表观测时趋于相近, 井下观测失去意义, 这与解滔等 (2016) 的分析结论一致。《井下地电阻率观测技术指导意见》^① 要求遵循井下观测中井深不小于 AB 的原则, 也说明在观测极距增加的同时, 电极埋深也需要逐步增加。

江宁台地表、井下地电阻率观测各个测向的供电极距与测量极距的比例不同,地表 NS 测向 (AB = 1000m; MN = 300m)、EW 测向 (AB = 1000m; MN = 300m) 和 NS 测向 (AB = 100m; MN = 16m) 观测分别为 1/3.33、1/3.33、1/6.25, 井下 NS 测向 (AB = 1000m; MN = 200m)、NS 测向 (AB = 200m; MN = 50m)、EW 测向 (AB = 200m; MN = 50m) 分别为 1/5、1/4、1/4, 因此, 须分别根据解释模型参数计算影响系数, B_1 、 B_2 、 B_3 分别为第 1~3 层的影响系数, 各个测向的各层影响系数如表 4 所示。由全国地电阻率观测台站多年的观测数据可知, 在浅层介质影响系数绝对值不大于 0.5% 左右的情况下观测数据较平稳, 季节性年变化幅度较小 (解滔等, 2016)。与地表观测相比, 江宁台井下观测的年变化幅度较小, 井下短极距观测的 B_1 均小于地表观测, 表明井下短极距 (AB = 200m; MN = 50m) 观测对浅层介质电阻率变化的抑制能力好于地表观测。井下短极距 (AB = 200m; MN = 50m) 观测第 2 层介质影响系数大于地表观测, 如果孕震作用引起第 2 层介质电阻率的变化, 则江宁台井下短极距 (AB = 200m; MN = 50m) 观测的映震能力要优于地表观测。井下 NS 测向 (AB = 1000m; MN = 200m) 观测的第 3 层介质影响系数明显大于地表观测和井下短极距观测, 表明如果孕震作用引起第 3 层介质电阻率的变化, 那么江宁台井下长极距观测映震能力要优于井下短极距观测和地表观测。用 ρ_{EW} 、 ρ_{NS} 分别表示江宁台地表观测 EW、NS 测向 (AB = 1000m; MN = 300m) 的视电阻率, 其相对变化值可用下式表示

$$\frac{\Delta\rho_{EW}}{\rho_{EW}} = 0.1926 \frac{\Delta\rho_1}{\rho_1} + 0.5869 \frac{\Delta\rho_2}{\rho_2} + 0.2206 \frac{\Delta\rho_3}{\rho_3} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta\rho_{NS}}{\rho_{NS}} = 0.5130 \frac{\Delta\rho_1}{\rho_1} + 0.4000 \frac{\Delta\rho_2}{\rho_2} + 0.0871 \frac{\Delta\rho_3}{\rho_3} \quad (5)$$

根据式 (4)、(5) 可得, 地表观测 NS 测向 (AB = 1000m; MN = 300m) 的年变化幅度为 EW 测向 (AB = 1000m; MN = 300m) 的 2 倍与其 B_1 相关的结论。

表 4 江宁台影响系数统计

观测装置位置	测向	B_1		B_2		B_3	
		NW-SE	NS	NW-SE	NS	NW-SE	NS
地表	NS (AB = 1000m)		0.5130		0.4000		0.0871
	NE (AB = 100m)		0.9419		0.0574		0.0007
	EW (AB = 1000m)	0.1926		0.5869		0.2206	
井下	NS (AB = 1000m)		0.2216		0.1418		0.6366
	NS (AB = 200m)		0.0043		0.9080		0.0876
	EW (AB = 200m)	0.0095		0.8668		0.1237	

4 关于江宁台井下观测装置设计的讨论

地电观测装置通常要求探测深度为 300~500m, 且越深越好。目前, 地电阻率的探测深度计算方法尚未有统一标准, 《井下地电阻率观测技术指导意见》^① 中采用物探电法计算了“K”型电性结构 3 层模型 (表 5) 时不同电极埋深、极距所对应的探测深度, 结果表明, 供电

极距 AB 为 200、1000m, 观测装置的电极埋深 $H < 100\text{m}$ 时, 探测深度增加速率较缓慢; 当电极埋深 $H > 100\text{m}$ 时, 探测深度增加速度加快 (图 5(a)), 这与毛先进等 (2017) 采用边界积分方程方法计算所得结论一致; 当电极埋深固定时, 地表、井下探测深度随极距线性增加, 即极距越大, 探测越深 (图 5(b))。根据《井下地电阻率观测技术指导意见》^①, 当电极埋深为 200m, 供电极距 AB 为 200、1000m 时, 探测深度分别为 335.150、861.625m, 基本满足需求。

表 5 “K”型分层模型

层厚/m	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)
10~<30	10~30
30~100	50~100
∞	10~30

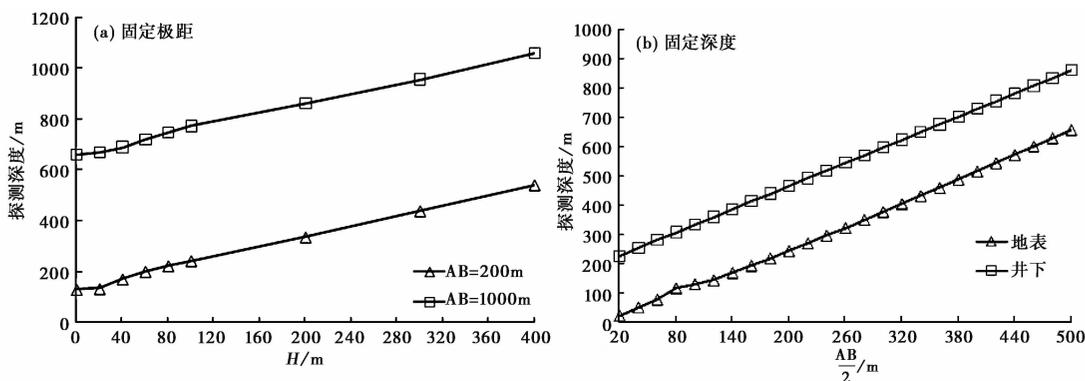


图 5 “K”型 3 层模型时探测深度随电极埋深和供电极距的变化

江宁台井下观测装置长极距、短极距的供电极距 AB 与测量极距 MN 之比为 1/5、1/4, 分别采用表 3 的电性结构 NS 测向解释模型计算各层介质影响系数随供电极距 AB 和电极埋深 H 的变化, 考虑到两者比例的计算结果相似, 仅列出比例为 1/4 时的计算结果 (图 6)。由图 6(a) 可见, 当极距 $AB/2 = 150\text{m}$ 、埋深 H 为 0~50m 时, 第 1 层介质影响系数变化幅度较大; 当 $AB/2 \geq 150\text{m}$ 、电极埋深 $H > 50\text{m}$ 时, 影响系数变化平稳且数值较小。当观测装置极距 $AB/2 < 250\text{m}$ 、电极埋深为 30~250m 时, 第 2 层介质影响系数占主导地位, 达到 0.6 以上 (图 6(b))。第 3 层介质影响系数依据 NS 测向和解释模型 NW-SE 测向所计算的结果略有不同 (图 6(c)、6(d)), 当 $AB/2 \leq 500\text{m}$ 、电极埋深 $H > 250\text{m}$ 时, 第 3 层影响系数迅速增加。目前, 江宁台井下观测系统中第 2 层介质地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, 地电阻率观测装置需兼备反映深部介质的变化, 因此江宁台井下观测系统需适当加大电极埋深, 由图 5 可见, 电极埋深 H 应不小于 250m。考虑到井下观测的工程投入和观测系统的稳定性, 如江宁台在建的井下垂直观测装置, 由于深度达 400m, 供电和缺数问题仍待解决, 因而电极不宜埋设太深。江宁台井下短极距 ($AB = 200\text{m}$; $MN = 50\text{m}$) 和长极距 NS 测向 ($AB = 1000\text{m}$; $MN = 200\text{m}$) 观测的影响系数及观测数据分析结果表明, 井下短极距观测显著强于长极距观测对地表干扰的抑制能力, 井下长极距 NS 测向 ($AB = 1000\text{m}$; $MN = 200\text{m}$) 的电极埋深达到 900m 时, 第 1 层介质影响系数 B_1 不大于 0.5% 才具备良好的对地表干扰的抑制能力。比较天水台 NS 测向 ($AB = 300\text{m}$; $MN = 100\text{m}$) 和平凉台 NS 测向 ($AB = 450\text{m}$; $MN = 150\text{m}$) 观测的第 1 层介质影响系数可知, 电极埋深 H 同为 100m 时, 前者明显好于后者, 表明当深度一定时, $AB/2$ 不宜过长。总

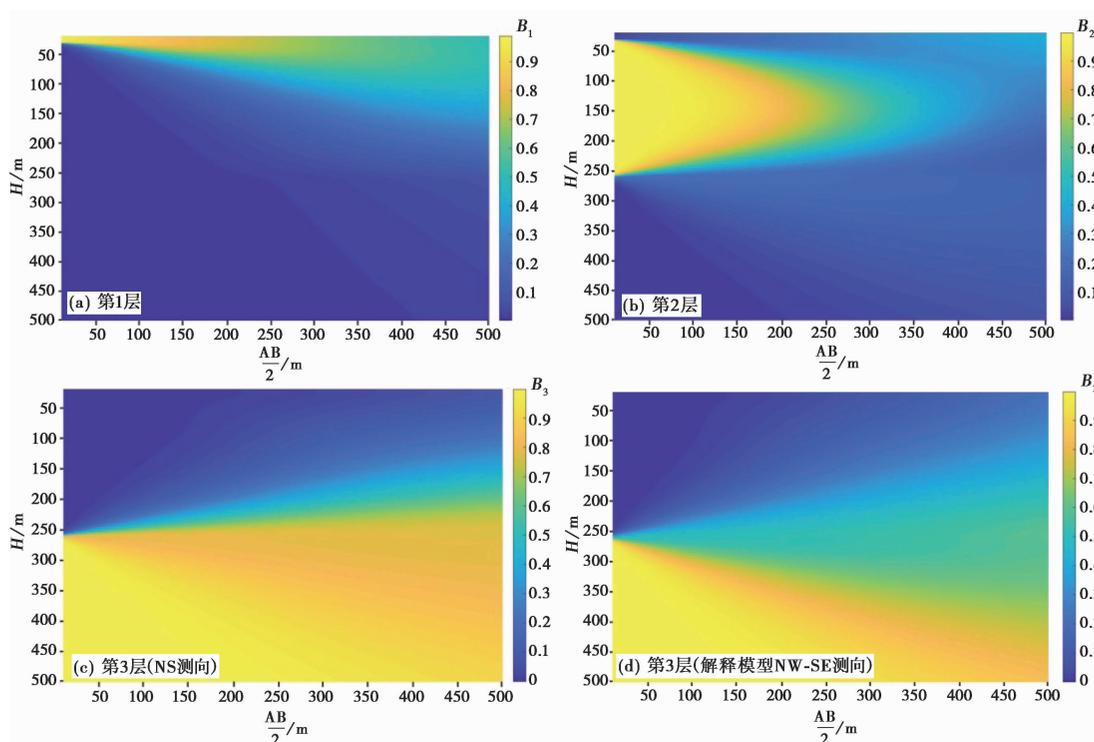


图 6 江宁台各层介质影响系数随供电电极距及深度的变化

体来说,江宁台井下观测设计之初是为了减少地铁的干扰,本文对影响系数和观测数据的分析结果表明,江宁台电极埋深 H 取 250m 左右、 $AB/2$ 取 100~150m 较合理。

5 结论与讨论

通过江宁台电测深曲线反演的电性结构,在 3 层水平层状介质模型下,计算了地表、井下地电阻率观测的各层影响系数,利用影响系数分析了地表、井下观测年变幅度的变化机理,研究了如何依据影响系数随电极埋深和供电电极距的变化来探讨合适的井深和观测极距,并结合探测深度对江宁台井下观测装置进行了评价,结果表明:

(1) 电极埋深 H 为 200m 时,供电电极距不宜过长, $AB/2$ 取 100~150m 较合理,如江宁台井下长极距 NS 测向 ($AB = 1000\text{m}$; $MN = 200\text{m}$) 观测对地表浅层干扰抑制能力较差,电极埋深 H 小于 100m 时对地表介质季节性干扰具有放大作用,仅当电极埋深达到供电电极距 AB 的 90% 时,第 1 层介质影响系数 B_1 才可能不大于 0.5%。

(2) 电极埋设越深,工程投入越大,观测系统稳定性也越差,如江宁台在建的地电垂向观测装置,井深最大达 400m,其供电电源功率不足、观测数据缺数多等问题仍待解决。江宁台井下观测设计之初是为了减少地铁的干扰,该装置为目前国内埋设最深的地电观测装置,为了兼顾第 2、3 层介质电阻率的变化,若适当加大电极埋深至 250m,则较为合理。

(3) 江宁台地表、井下地电阻率观测均表现出“夏低冬高”的正常年变形态,地表、井下 NS 测向观测的年变化幅度均为 EW 测向的 2 倍左右,前者与第 1 层介质影响系数 B_1 相差约

2 倍有关,但后者 B_1 相近,其原因还需进一步讨论。

致谢: 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

- 樊晓春、吴帆、袁慎杰,2018a,江宁台地电阻率数据干扰分析,内陆地震,32(2),163~171.
- 樊晓春、吴帆、袁慎杰,2018b,江宁地电台深井地电阻率观测系统分析,地震地磁观测与研究,39(3),102~106.
- 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、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.
- 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、104.
- 解滔、李飞、沈红会等,2013,新沂地震台地电阻率反向年变分析,地震学报,35(6),856~864.
- 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),1125~1135.
- 解滔、王洪波、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.
- 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实验分析,地震工程学报,35(1),190~195.
- 刘君、杜学彬、陈军营等,2015,地表与井下地电阻率观测数据分析,地震,35(1),112~122.
- 毛先进、杨玲英、钱家栋,2014,水平层状介质中深埋装置系统地电阻率影响系数特征研究,地震学报,36(4),678~685.
- 毛先进、杨玲英、赵晋民等,2017,井下地电阻率观测的探测深度初步研究,地震学报,39(2),230~238.
- 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.
- 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、卢振业、丁鉴海等,1998,电磁学分析预报方法,北京:地震出版社.
- 钱家栋、马钦忠、李劲稔,2013,汶川 M_s 8.0 地震前成都台 NE 测线地电阻率异常的进一步研究,地震学报,35(1),4~17.
- 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.
- 沈红会、李鸿宇、袁慎杰等,2014,江宁台地电场地铁干扰实验结果分析,地震,34(3),125~131.
- 沈红会、王丽、王维等,2017,地电阻率长期趋势变化及其预测意义,地震学报,39(4),495~505.
- 王兰炜、张世中、张宇等,2014,井下地电阻率观测中装置系数的计算——以天水地震台井下观测为例,工程地球物理学报,11(1),50~59.
- 王兰炜、张宇、张世中等,2015,我国井下地电阻率观测技术现状分析,地震地磁观测与研究,36(2),95~102.
- 王同利、李妍、武晓东等,2017,延庆台地电阻率铁质干扰的有限元模拟,地震学报,39(4),520~530.
- 许忠祥、安张辉、于华等,2014,海安台井下与地表地电观测对比实验研究,地球物理学进展,29(4),1588~1596.
- 杨兴悦、杨立明、康云生等,2012,天水地震台井下地电观测系统介绍及其分析,地震研究,35(1),92~97.
- 姚文斌,1989,电测深数值计算和解释入门,北京:地震出版社.
- 张世中、石航、王兰炜,2013,地电台站受城市轨道交通干扰的测试分析与抗干扰措施研究,地震学报,35(1),117~124.
- 张宇、张兴国、王兰炜等,2016,新型地电阻率交流观测系统研究及江宁台观测实验,地震学报,38(5),807~810.
- 赵斐、叶青、解滔等,2018,平凉台井下地电阻率观测影响系数分析,中国地震,34(1),104~111.

Sensitivity Coefficients Analysis of Deep-well Resistivity Observation in the Jiangning Seismic Station

*Fan Xiaochun*¹⁾ *Xie Tao*²⁾ *Wu Fan*¹⁾ *Yuan Shenjie*¹⁾

1) Nanjing Earthquake Monitoring and Early Warning Center, Nanjing 210008, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract With the analytical expression of the potential of a point-level power supply with a horizontal layered uniform medium at an arbitrary depth, we take the three-layer electrical structure of the Jiangning seismic station as an example, analyze the variation of the influence coefficient of each layer with depth and pole distance when the symmetrical quadrupole resistivity is observed, and combined with the depth of detection, explore the distributions of influence coefficients with the spacing and depth of electrodes when the Schlumberger arrays are used in the resistivity observation. The results show that the deep-well observation of the Jiangning seismic station has good inhibition to surface and shallow interference. The short-range observation has a significantly better ability to suppress shallow surface disturbance than the long-range observation. Disturbances from surface might be amplified when the deep-well observation is within 100m for the K-type electrical structure. For the fixed sensitivity coefficient, the electrode burial depth increases with the current electrode length. The annual variation features are analyzed by calculating the influence coefficient of each layer. It is reasonable to take 100~150m from the electrode length and 250m from the electrode buried depth. The calculated results could be used as reference for the selection of electrode buried depth and current electrode length when deep-well observation would be used in similar stations.

Key words: Geo-electrical resistivity; Deep-well observation; Influence coefficient; Probing depth; Electrical structure