

樊晓春, 李伟, 孙君嵩, 丁烨, 吴帆, 袁慎杰, 2020. 垂向地电阻率观测装置系数的计算——以江宁地震台为例. 震灾防御技术, 15(3): 651—657. doi: 10.11899/zfy20200320

垂向地电阻率观测装置系数的计算 ——以江宁地震台为例¹

樊晓春¹⁾ 李伟²⁾ 孙君嵩³⁾ 丁烨²⁾ 吴帆¹⁾ 袁慎杰⁴⁾

1) 南京市地震监测预警中心, 南京 210008

2) 南京基准地震台, 南京 210014

3) 江苏省地震局, 南京 210014

4) 南京市江宁区地震办公室, 南京 210014

摘要 井下地电阻率观测装置系数与电流的空间分布及电极位置有关, 应针对不同的观测装置进行计算。本文以江苏省江宁地震台垂向观测为例, 利用传统垂直观测装置系数方法、全空间及不完全全空间方式计算装置系数, 比较不同装置系数对垂向观测的影响。研究表明, 采用不完全全空间并考虑井距的装置系数计算方法适合江宁地震台垂向观测。

关键词: 地电阻率 垂向观测 装置系数 井距

引言

地震前兆观测主要关注观测数据随时间的相对变化, 装置系数误差不影响观测数据的相对变化, 但不正确的装置系数可能导致地电阻率观测结果出现系统误差(王兰炜等, 2014), 因此, 正确的装置系数有利于不同区域观测数据的对比和地震前兆数据的研究。自 2009 年起, 河北大柏舍台, 甘肃天水台、武都台、平凉台, 陕西合阳台实施了井下地电阻率垂直观测试验, 井孔深 100—225m, 供电电极距 60—120m, 测量极距 20—60m(刘君等, 2015; 王兰炜等, 2015)。上述台站地电阻率垂向观测通常为 1 个钻孔, 供电电极和测量电极均布设于 1 个钻孔中, 部分垂向观测的供电电极 A 接近地表, 如天水台、武都台、合阳台的供电电极 A 埋深仅 4—5m; 部分垂向观测的供电电极 A 埋深为 40m 左右, 如大柏舍台。垂向地电阻率观测中的装置系数与电流的空间分布及电极位置有关, 现有垂向观测装置系数计算方法依据地下点、地表点电流源产生的电场计算得出, 忽略了供电电极 A 的埋深。江宁台深井垂向地电阻率观测装置为在 2 口深井进行垂向观测的试验装置, 与传统垂向地电阻率观测装置不同。本文根据地下点电流源产生的电场讨论装置系数计算方法, 并比较计算方法对江宁台

1 基金项目 地震科技星火计划(XH19015YSX); 国家自然科学基金(A413740808)

[收稿日期] 2019-09-16

[作者简介] 樊晓春, 男, 生于 1984 年。硕士研究生, 工程师。主要从事台网管理及地电阻率应用研究工作。E-mail: fanxiaochungis@163.com

[通讯作者] 李伟, 男, 生于 1969 年。高级工程师。主要从事地震监测预报、地震观测系统维护方面的研究工作。E-mail: 553813216@qq.com

垂向地电阻率观测的影响。

1 台址概况

江宁台地处南京市江宁区禄口街道水荆墅村，地形开阔平坦，周围无大中型工矿企业，测区位于南京-湖熟断裂南西盘和方山-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。测区内现有垂向地电阻率观测装置为在 2 口深井进行垂向观测的试验装置，井距 5.17m，供电电极 A、测量电极 M 分别布设在深 275m 的 2 号井内 200m 和 275m 处，供电电极 B、测量电极 N 分别布设在深 400m 的 1 号井内 400m 和 325m 处（图 1）。该垂向观测系统采用 ZD8BI 型地电仪，根据《地震台站建设规范（地电台站第 1 部分）》（DB/T.18.1—2006）中关于地电阻率台站的技术要求，对新建垂向观测装置的场地进行高密度电法、电测深等测试。高密度电法探测和电测深报告中 NW—SE 和 NS 测线结果表明，观测区域电测深曲线具有 K 形特征，电性结构等效为 3 层（樊晓春等，2018），场地电性层参数见表 1。

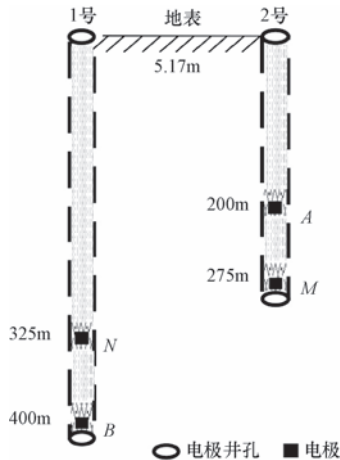


图 1 江宁台垂向观测电极布极图

Fig. 1 The diagram of electrodes deployment

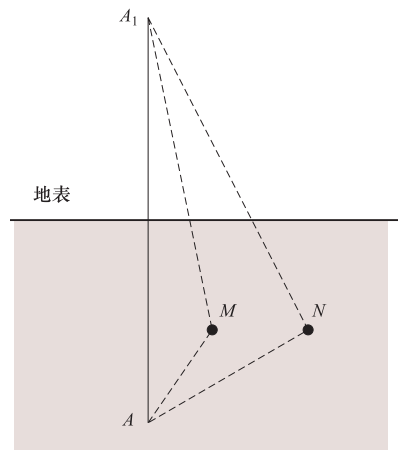


图 2 地下点电源产生的电场示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the electric field generated by underground point power supply

表 1 江宁台场地电性层参数

Table 1 The underground electrical structure of Jiangning geoelectric station

NW—SE 测线		NS 测线	
层厚/m	电阻率/ $\Omega \cdot m$	层厚/m	电阻率/ $\Omega \cdot m$
29.40	39.29	24.56	18.71
220.94	143.06	203.42	274.52
∞	60.39	∞	54.79

2 点电流源在非全空间产生的电场

点电流处于不完全全空间时，对点电流源位于地下和地表 2 种情况进行讨论。地下点电

流源产生的电场指点电流源的电流 I 在地下一定深度时流入地下介质中产生的电场, 为不完全全空间。假设地下介质电性均匀, 介质电阻率为 ρ , 电流 I 从地下 A 点流入 (图 2), 采用镜像法计算 (刘昌谋等, 1994; 刘国兴, 2005), 见式 (1)。地表点电流源产生的电场指地表点电流源电流 I 流入地下介质, 从无限远处流出时在介质中产生的电场, 为半无限空间。假设地下介质电性均匀, 介质电阻率为 ρ , 电流 I 从地表 A 点流入地下, 电流线的分布以 A 为中心向周围呈辐射状, 该情况为图 2 的特例 (王兰炜等, 2014), 见式 (2)。

(1) 地下点电流源产生的电场 (不完全全空间)

$$V_{MN} = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{AM} + \frac{1}{A_1M} - \frac{1}{A_1N} - \frac{1}{AN} \right) \quad (1)$$

(2) 地表点电流源产生的电场 (半无限空间)

$$V_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) \quad (2)$$

3 装置系数计算方法

装置系数是地电阻率观测中特有的参数, 通常用 K 表示, 与观测装置中电极分布情况有关, 表征地电阻率是视电阻率 (王兰炜等, 2014)。当测区区域介质电阻率均匀分布时, 地电阻率 ρ_s 与介质真实的电阻率 ρ 数值相同。

根据奥斯定理和镜像原理 (钱家栋等, 1985), 假设测区为均匀介质, 垂向观测中的装置系数计算方法如下:

(1) 方法 I: 传统垂向观测装置系数计算方法 (王兰炜等, 2014)

传统方法井下垂向观测装置忽略电极 A 的埋深, 在点电源 B 与地面对称的位置设镜像点 B_1 , 见图 3 (a)。根据式 (1) 和式 (2), 则 K 为:

$$K = \frac{4\pi}{\left(\frac{2}{AM} - \frac{2}{AN} \right) - \left(\frac{1}{BM} + \frac{1}{B_1M} - \frac{1}{B_1N} - \frac{1}{BN} \right)} \quad (3)$$

不考虑江宁台垂向观测电极 A 埋深时, 因江宁台垂向观测 $\overline{AM} = \overline{BN}$, $\overline{AN} = \overline{BM}$, 则:

$$K = \frac{4\pi}{\frac{3}{AM} - \frac{3}{AN} - \frac{1}{B_1M} + \frac{1}{B_1N}} \quad (4)$$

(2) 方法 II: 采用全空间方式的装置系数计算方法 (钱家栋等, 1985; 王兰炜等, 2014) 当电极埋深 h 远大于供电极长度 \overline{AB} 时, 为全空间, 则 K 为地表观测装置系数的 2 倍, 即:

$$K = \frac{4\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (5)$$

(3) 方法 III: 采用不完全全空间方式的装置系数计算方法

江宁台垂向观测的电极 A 、 M 、 N 、 B 分别位于埋深 200m、275m、325m、400m 处, 应按地下点电源产生的电场模型计算 (不完全全空间), 如图 3 (b) 所示。在点电源 A 、 B 与地面对称的位置设镜像点 A_1 、 B_1 , 忽略 1 号井和 2 号井的水平距离 l , 根据式 (1), 则供电电流 I

(+I 和 -I) 在 M、N 间产生的电位差为:

$$V_{MN} = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} + \frac{1}{A_1M} - \frac{1}{A_1N} - \frac{1}{AN} \right) - \left(\frac{1}{BM} + \frac{1}{B_1M} - \frac{1}{B_1N} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (6)$$

则 K 为:

$$K = \frac{4\pi}{\left(\frac{1}{AM} + \frac{1}{A_1M} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{A_1N} \right) - \left(\frac{1}{BM} + \frac{1}{B_1M} - \frac{1}{BN} - \frac{1}{B_1N} \right)} \quad (7)$$

因江宁台垂向观测 $\overline{AM} = \overline{BN}$, $\overline{AN} = \overline{BM}$, 则:

$$K = \frac{4\pi}{\frac{2}{\overline{AM}} - \frac{2}{\overline{AN}} + \frac{1}{\overline{A_1M}} - \frac{1}{\overline{A_1N}} - \frac{1}{\overline{B_1M}} + \frac{1}{\overline{B_1N}}} \quad (8)$$

(4) 方法IV: 采用不完全全空间方式 (考虑井距 l) 的装置系数计算方法

按照地下点电源产生电场的模型计算 (不完全全空间), 在点电源 A、B 与地面对称的位置设镜像点 A_1 、 B_1 , h_1 、 h_2 、 h_3 表示供电电极 A、B、M 的电极埋深, 井距 l 表示 2 口井孔水平距离 (图 3 (c)), 则:

$$\overline{AM} = h_3 - h_1 \quad (9)$$

$$\overline{AN} = \sqrt{l^2 + (h_2 - h_3)^2} \quad (10)$$

$$\overline{A_1M} = h_1 + h_3 \quad (11)$$

$$\overline{A_1N} = \sqrt{l^2 + (h_2 + 2h_1 - h_3)^2} \quad (12)$$

$$\overline{B_1M} = \sqrt{l^2 + (h_2 + h_3)^2} \quad (13)$$

$$\overline{B_1N} = 2h_2 - h_3 + h_1 \quad (14)$$

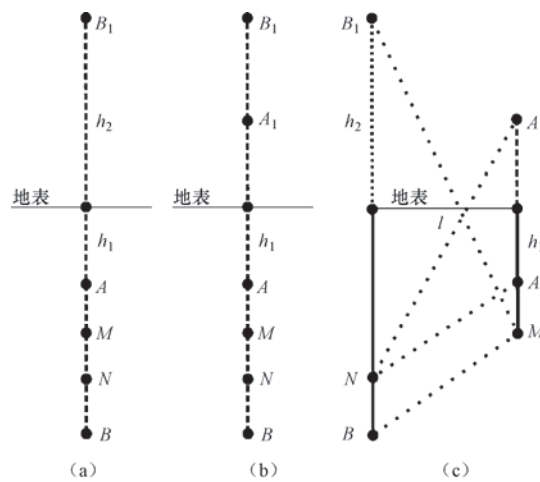


图 3 江宁台垂向观测示意

Fig. 3 The schematic diagram of vertical geo-resistivity observation

将式 (9) 至式 (14) 代入式 (8), 则 K 变为:

$$K = \frac{4\pi}{\frac{2}{h_3 - h_1} - \frac{2}{\sqrt{l^2 + (h_2 - h_3)^2}} + \frac{1}{h_1 + h_3} - \frac{1}{\sqrt{l^2 + (h_2 + 2h_1 - h_3)^2}} - \frac{1}{\sqrt{l^2 + (h_2 + h_3)^2}} + \frac{1}{2h_2 - h_3 + h_1}} \quad (15)$$

4 江宁台垂向地电阻率观测装置系数计算

采用方法 I—IV 分别计算江宁台垂向地电阻率观测的装置系数 K ，结果见表 2。考虑江宁台垂向地电阻率观测的电极布设不同于传统垂向观测装置，所有电极埋深均在 200m 以上，本文认为应以方法 IV 为参考值，采用式 (16) 计算不同装置系数计算方法的相对误差。方法 I、II、III 相对误差分别为 -32.01%、1.37%、0.43%，可知方法 I 不适用于江宁台垂向地电阻率观测，该计算方法通常仅适用于供电电极 A 埋深小于 5m 的垂向观测，如天水台、合阳台。方法 II 相对误差较小，江宁台垂向观测于 2018 年 4 月 25 日至 2018 年 11 月 22 日曾采用该方法。考虑仅当电极埋深远大于供电电极距时称为全空间，而江宁台垂向装置最小电极埋深仅与供电电极距相当，因此，方法 II 同样不适用于江宁台垂向观测。除江宁台外，大部分台站观测装置电极埋深明显小于供电电极距，均不宜采用方法 II。方法 III 相对误差最小，江宁台垂向地电阻率观测于 2018 年 11 月 23 日至 2019 年 10 月 30 日曾采用该方法，2018 年 11 月出现的台阶是由调整装置系数导致的（图 4）。由于江宁台垂向地电阻率观测为多孔观测，须考虑井距才能准确计算其装置系数，因而最终采用方法 IV 进行计算。

$$\sigma = \frac{k_{\text{方法I}} - k_{\text{方法IV}}}{k_{\text{方法IV}}} \quad (16)$$

表 2 江宁台垂向观测的装置系数

Table 2 The configuration coefficient of vertical geo-resistivity observation in Jiangning earthquake station

计算方法	\overline{AM} /m	\overline{AN} /m	$\overline{B_1M}$ /m	$\overline{B_1N}$ /m	$\overline{A_1M}$ /m	$\overline{A_1N}$ /m	装置系数 K
I	75.000	125.000	675.000	725.000	—	—	790.000
II	75.000	125.000	—	—	—	—	1178.000
III	75.000	125.000	675.000	725.000	475.000	525.000	1167.000
IV	75.000	125.374	675.020	725.000	475.000	525.292	1162.000

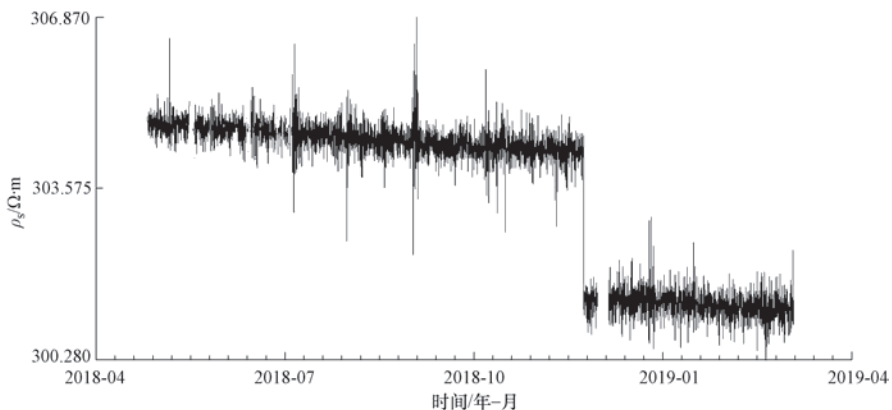


图 4 江宁台垂向观测整点值曲线

Fig. 4 The hourly observational value curves of vertical geo-resistivity observation at Jiangning Seismic Station

5 结论

本文以江宁台垂向地电阻率观测为例,提出 2 种以不完全全空间方式计算的新方法,并与现有垂向观测装置计算方法进行比较。研究表明,方法Ⅳ最符合江宁台垂向地电阻率观测装置。考虑方法Ⅳ中部分参数存在小数部分,认为保留小数点后三位能满足装置系数精度要求。方法Ⅳ除适用于 2 口井垂向观测装置外,同样适用于忽略井距时供电电极 A 埋深超过 5m 的单口井垂向观测装置。

致谢 衷心感谢中国地震局地壳应力研究所王兰炜研究员对本文提出的建议和意见。

参考文献

- 樊晓春,吴帆,袁慎杰,2018.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.
- 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.
- 刘国兴,2005.电法勘探原理与方法.北京:地质出版社.
- 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.
- 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.
- 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.

Calculation of Configuration Coefficient in the Vertical Geo-resistivity Observation——Taking the Jiangning Seismic Station as an Example

Fan Xiaochun¹⁾, Li Wei²⁾, Sun Junsong³⁾, Ding Ye²⁾,
Wu Fan¹⁾ and Yuan Shenjie⁴⁾

1) Nanjing Earthquake Monitoring and Early Warning Center, Nanjing 210019, China

2) Nanjing Seismic Station, Nanjing 210014, China

3) Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China

4) Seismic Station of Jiangning, Nanjing 210014, China

Abstract Since the configuration coefficient in the deep-well geo-electrical resistivity observation is associated with distribution of electric current and the positions of electrodes in the four-electrode geo-electrical observation device. In this paper, taking the Jiangning seismic station as an example, the configuration coefficient of vertical geo-resistivity observation in Jiangning seismic station is calculated by half-space model, full-space model and non-full-space model method, and the influence of different configuration coefficients on vertical observation are compared. Results show that the calculation for the configuration coefficient using non-full-space model method and considering the horizontal distance of boreholes is in accordance with the vertical observation at Jiangning Station.

Key words: Geo-electrical resistivity; Vertical observation; Configuration coefficient; Well spacing