

樊晓春,李伟,叶青,等,2020. 江宁台井下地电阻率电极接地电阻分析. 中国地震,36(1):126~135.

江宁台井下地电阻率电极接地电阻分析

樊晓春¹⁾ 李伟²⁾ 叶青³⁾ 袁慎杰⁴⁾ 王昕⁵⁾

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)中国地震台网中心,北京 100045

4)南京市江宁区地震办公室,南京 210014

5)江苏省海安地震台,江苏海安 226600

摘要 电极是否稳定可靠是地电阻率观测系统的重要指标之一,主要通过测量电极的接地电阻大小来评价其状态。首先,分析现有测量方法,认为线路加电测量法更合理,提出考虑电缆线电阻的线路加电测量法;其次,采用该方法和接地电阻测试仪测量方法,测量江宁台多套地电阻率观测系统电极的接地电阻,比较分析后者的结果误差;第三,讨论其接地电阻超出标准、同深度不同电极接地电阻差异及同井孔不同深度电极接地电阻差异,其原因可能与地下低电阻率区域及电极周围的地层湿度、介质的孔隙度有关,并分析了加电测量法存在的不足;最后,当接地电阻超标时,应该依据其变化幅度来判定电极是否稳定可靠。

关键词: 地电阻率 井下观测 加电测量法 接地电阻

[文章编号] 1001-4683(2020)01-0126-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

井下地电阻率观测有助于减轻地表干扰并提高观测数据质量(刘昌谋等,1994;田山等,2009;聂永安等,2010;王兰伟等,2015;刘君等,2015;樊晓春等,2018)。自2008年开始,河北大柏舍台、甘肃兰州观象台、天水台、武都台、平凉台、陕西合阳台、新疆昌吉台、江苏江宁台等15个台站实施了井下34~400m深的地电阻率实验观测。电极是地电阻率观测系统中人工电流供给与人工电位差测量的传感器,电极是否稳定可靠是地电阻率观测系统的重要指标之一,主要通过测量电极的接地电阻大小来评价其性能。根据《DB/T 18.1-2006 地震台站建设规范 地电观测台站 第1部分:地电阻率台站》(下文简称规范)(中国地震局,2006),各地电台站需每个季度对观测系统进行全面检查,电极接地电阻测量是其中一项主要测试项目。作为观测装置的重要指标之一,电极是否稳定可靠,除了取决于铅电极本身的性能外,还取决于电极的耦合状态,即电极的接地电阻(马可兴等,2013)。在地表观测中,通

[收稿日期] 2019-10-21; [修定日期] 2019-12-25

[项目类别] 地震科技星火计划(XH19015YSX)、国家自然科学基金(A413740808)共同资助

[作者简介] 樊晓春,男,1984年生,硕士,工程师,主要从事地电阻率观测研究。E-mail:fanxiaochungis@163.com

李伟,通讯作者,男,1969年生,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

常采用 ZC-8、ZC29-2 等接地电阻测试仪,断开电极线直接测试,进而判断电极与大地的耦合状态;而在深井观测中则不能断开电极线,测试要在观测室内的“测试箱”中完成。目前,井下观测缺少电极接地电阻的测量方法标准,绝大部分台站仍按照原规范来进行管理和维护。各台站在电极的接地电阻测量方法上各不相同,多数台站沿用原地表观测的测量方法完成电极的接地电阻测量,即通过接地电阻测试仪测量。其结果真实性以及与不同测量方式的测量结果差异性均缺少研究,亟需选择符合井下观测的电极接地电阻测量方法,从而更加准确地测量电极接地电阻,以便各台站评价其井下观测电极是否稳定可靠。本文首先介绍了江宁台台址概况和现有井下地电观测电极接地电阻测试方法,分析原地表地电观测采用的接地电阻测试仪方法的不足,并在线路加电测试法基础上提出考虑电缆线电阻的线路加电测量法;其次,采用该方法和原地表地电观测采用的接地电阻测试仪方法对江宁台的多套地电观测系统进行测量,比较分析 2 种方法的结果误差;第三,讨论接地电阻超出标准、同深度不同电极接地电阻差异、同井孔不同深度电极接地电阻差异以及加电测量法的不足;最后,提出采用线路加电测量法时须考虑电缆线电阻,该方法更符合井下观测,并探讨如何更合理地评价井下观测电极是否稳定可靠。

1 台址概况

江宁台始建于 1978 年,因城市建设,先后于 1994 年、2003 年 2 次搬迁观测场地,现位于南京市江宁区禄口街道。地电观测区地貌属冲积平原,以耕地为主。测区构造单元为中生代火山岩盆地,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。自 2015 年 11 月开始在原测区进行井下地电阻率水平向观测,为国内首个达到 200m 井深的地电水平向观测系统(樊晓春等,2019)。自 2018 年 4 月开始在原测区进行垂向地电阻率观测(400m 井深),为目前国内建成并运行观测的 10 多个台站中钻孔和电极埋深最大的台站,是井下多孔垂向实验观测的典型。井下水平向、垂向地电阻率观测系统相互独立,其中,井下水平向观测采用四极对称观测方式,布极呈“十”字状,垂向观测为多孔观测(图 1)。供电电极、测量电极布设情况和装置系数见表 1。高密度电法探测和电测深报告^①的 NW—SE 和 NS 测向结果表明,观测区域的电测深曲线具有“K”型特征,电性结构等效为 3 层,场地的电性层参数详见表 2。

2 电极接地电阻测试方法分析

目前,各地电阻率观测台站主要采用以下 4 种方法。方法 I:直接用接地电阻测试仪测量;方法 II:间接用接地电阻测试仪测量;方法 III:测量电极间自然电位差;方法 IV:采用加电测试法来测量井下地电观测电极的接地电阻,并依据接地电阻大小来评价井下地电观测电极是否稳定可靠。由于井下观测装置中被测电极远离测试仪,不符合采用接地电阻测试仪测量的前提条件,方法 I、II、III 测量结果的真实性以及与不同方法测量结果的差异缺少研究。具体方法和特点如下:

方法 I:直接用接地电阻测试仪测量。沿用原地表观测的测量方法完成电极的接地电

^① 江宁区地震办公室,2015,江宁区地铁地震保护工程初步验收报告。

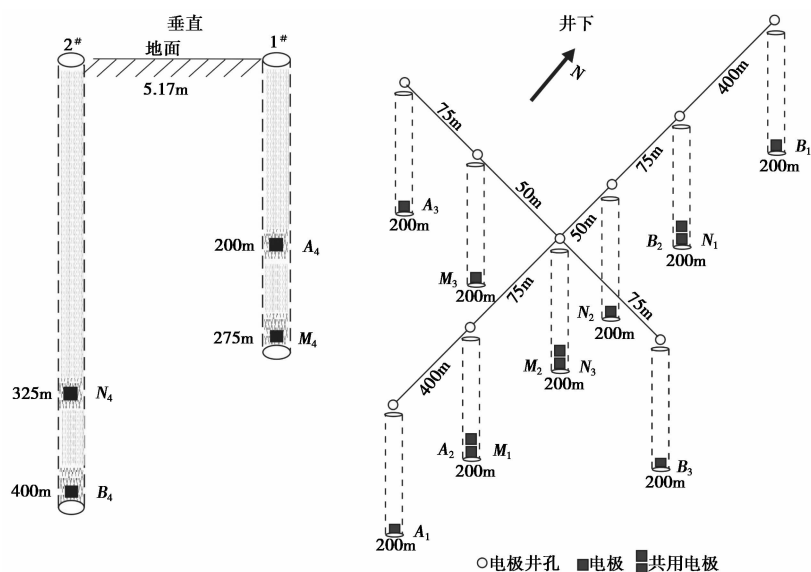


图 1 江宁台井下水平、垂向观测布极示意图

表 1 供电极、测量极布设情况和装置系数

观测类型	供电极距 AB/km	测量极距 MN/km	方向	装置系数 K/km
深井	1.0	0.20	NS	5.151
	0.2	0.05	NS	1.172
	0.2	0.05	EW	1.275
垂向	0.2	0.05		1.166

表 2 江宁台电测深曲线反演的电性结构

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

阻测量,即通过接地电阻测试仪测量,如南京台、海安台、江宁台、武都台均采用该方法。井下观测装置中,一般被测电极远离测试仪,故测量结果不够精确(高曙德等,2016;梁浩东等,2017),但作为性能评估具有实用意义。

方法Ⅱ:间接用接地电阻测试仪测量。部分台站在方法Ⅰ的基础上,根据井孔中3个电极的分布属于“全空间”或“近全空间”来选择一个比例系数,全空间的比例系数为2,近全空间的比例系数为与E相接的电极的深度除以96m(假设测试仪装置是一个60m极距的三极精密测试装置来判定是否为全空间的96m标准)再加上1,用该比例系数乘以接地电阻测试仪的仪表读数,最后减去线电阻作为接地电阻测量结果(梁浩东等,2017)。该方法属于方法Ⅰ的改进,要求测量的3个电极在1条轴线且满足E-P为20m、E-C为40m,绝大部分井下观测台不满足该条件,使用该方法的台站有新疆昌吉台、甘肃平凉台。

方法Ⅲ:测量电极间自然电位差。一部分台站使用了数字万用表测量电极之间的自然电位差,通过观察该值来判定电极的稳定性(马可兴等,2013),如电极与地下介质接触不良时,自然电位差测值漂移,绝对值也较大(高输入阻抗的仪表自身的特性所决定),武都台曾用该方法来检查电极是否稳定可靠,但通常需要较多的测量数据才能判断是否故障。

方法Ⅳ:线路加电测量法。通过稳流源供电测量任意2个电极的电位差的方式来计算

电极接地电阻^②。该方法测量的电极的接地电阻包括电缆的线电阻、电极的接地电阻、2 个电极间介质的电阻、电极与介质的耦合电阻,计算时忽略电缆的线电阻和 2 个电极间介质的电阻,使用该方法的台站为江宁台。

3 电极接地电阻分析

3.1 提出线电阻的线路加电测量法

通常井下地电阻率水平向、垂向观测装置使用的电缆较长,如江宁台、南京台等。为了更准确地估算电极的接地电阻,提出考虑电缆线电阻的线路加电测量法(下文简称方法 V)。与方法 IV 相比,测量电极的接地电阻不包含电缆的线电阻,更接近真实电极的接地电阻,有利于评价电极是否稳定可靠。通常井下地电阻率观测要求测量导线、供电导线的线路电阻要小于 $10\Omega/\text{km}$ (胡哲等,2017)。根据式(1)可计算任意长度电缆的线电阻,江宁台井下地电阻率水平向和垂向观测装置使用的定制电缆中导线为截面积 4mm^2 的黄铜线,其电阻率为 $0.0196\mu\Omega/\text{m}$,得出每千米定制电缆的线电阻为 4.9Ω ,满足要求,各电极相连的电缆线电阻见表 3。设 $R_{A\text{线}}$ 、 $R_{M\text{线}}$ 、 $R_{N\text{线}}$ 、 $R_{B\text{线}}$ 为根据电极埋深和外线路电缆长度估算 A、M、N、B 电极的线缆电阻。具体测量方法为将地电阻仪电源输出线缆和测量线缆分别连接电极 A、B,由地电阻率仪控制稳流源向电极 A 和 B 供电,输出电流 I_1 和两电极电位差 V_{AB} ,以此类推将稳流源连接 A 和 M、B 和 M、M 和 N,得到 I_2 和 V_{AM} 、 I_3 和 V_{BM} 、 I_4 和 V_{MN} ,可得式(2),解方程可以得每个电极的接地电阻。

表 3 江宁台井下地电观测的电缆线电阻

井下水平向观测电极线电阻/ Ω									垂向观测电极线电阻/ Ω			
B_1	B_2/N_1	N_2	M_2/N_3	A_2/M_1	A_1	B_3	M_3	A_3	A_4	M_4	N_4	B_4
5.8	3.9	3.6	3.3	3.0	1.2	3.7	3.6	3.9	1.2	1.6	1.8	2.2

$$R_{\text{线}} = \rho = \frac{L}{S} \quad (1)$$

$$\begin{cases} R_A + R_B + R_{A\text{线}} + R_{B\text{线}} = \frac{V_{AB}}{I_1} \\ R_A + R_M + R_{A\text{线}} + R_{B\text{线}} = \frac{V_{AM}}{I_2} \\ R_B + R_M + R_{B\text{线}} + R_{M\text{线}} = \frac{V_{BM}}{I_3} \\ R_M + R_N + R_{M\text{线}} + R_{N\text{线}} = \frac{V_{MN}}{I_4} \end{cases} \quad (2)$$

3.2 井下水平向观测

采用方法 I 准确测量的前提为 E、P、C 在 1 条轴线且满足 E-P、E-C 等间距,由于井下地电观测不具备该前提,需要比较采用方法 I 和方法 V 测量江宁台井下地电水平向观测电极的接地电阻结果的误差。在该装置未封井时采用方法 I 计算,2015 年 9 月 23 日封井后采用

^② 王兰炜等,2017,井下地电阻率观测技术指导意见。



方法 V 计算。方法 I 直接使用接地电阻测试仪测量电极的接地电阻,方法 V 根据式(2)代入表 3 的电缆线电阻进行计算,测量结果见表 4。第 1 次采用方法 I 的测量结果中部分电极接地电阻明显偏小。后续多次采用方法 I 测量的结果相对平稳,其最大变化幅度为 17.91%。而采用方法 V 在 5 次测量中的数据最大变化幅度仅为 12.6%,稳定性略好于方法 I。计算方法 I 和方法 V 的多次测量结果的平均值, B_1 、 B_2/N_1 、 A_2/M_1 、 A_1 、 A_3 电极的测量结果分别相差-21.7%、-14.1%、10.8%、16.7%、8.4%,其他电极测量结果小于 4%,该误差符合预期。因此,方法 I 仅能作为电极状态的初步性能评估,而方法 V 的测量结果更接近电极真实的接地电阻,更适合评估井下观测电极是否稳定可靠。另外,3 个共用电极包括 B_2/N_1 、 M_2/N_3 、 A_2/M_1 ,加电测试时会计算出 2 次测量结果,5 次测量结果中相差最大约为 2.4 Ω ,表 4 中共用电极的接地电阻均以最小值为最终结果。最近的 1 次测量为 2019 年 12 月 12,其结果分别相差-2.3 Ω 、-0.6 Ω 、-1.3 Ω 。我们认为 2 次测量结果存在误差的原因可能为:①万用表自身误差;②供电时间较短,小于 5s,未完全稳定;③读数时存在人为因素;④存在大地的“电容效应”。

表 4 江宁台井下水水平向地电观测电极的接地电阻

时间 (年-月-日)	井下水平向观测电极线电阻/ Ω									测试 方法
	B_1	B_2/N_1	N_2	M_2/N_3	A_2/M_1	A_1	B_3	M_3	A_3	
2015-05-09	36.0	4.0	80.0	67.0	97.0	114.0	61.0	62.0	6.7	方法 I
2015-05-20	42.0	21.0	80.0	68.0	98.0	114.0	67.0	64.0	23.0	方法 I
2015-05-26	40.0	20.0	81.0	79.0	100.0	114.0	66.0	60.0	22.0	方法 I
2015-06-09	36.0	20.0	80.0	67.0	97.0	113.0	60.0	62.0	23.0	方法 I
2015-06-19	36.0	20.0	80.0	67.0	96.0	112.0	60.0	62.0	23.0	方法 I
2015-07-29	36.0	20.0	80.0	68.0	97.0	114.0	61.0	62.0	22.0	方法 I
2015-09-23	36.0	20.0	81.0	68.0	97.0	114.0	65.0	63.0	23.0	方法 I
2015-11-17	29.5	15.1	83.7	73.4	108.0	135.1	65.0	61.2	18.4	方法 V
2016-12-02	30.2	14.1	82.4	70.7	109.0	132.8	64.3	62.4	19.1	方法 V
2017-12-08	31.3	16.0	81.9	72.6	106.0	129.6	65.7	60.8	18.7	方法 V
2018-09-19	27.8	15.8	82.5	72.0	108.4	131.9	66.0	61.1	18.8	方法 V
2019-12-12	27.8	15.7	82.7	72.1	108.3	133.2	65.6	61.5	18.4	方法 V
平均值	37.4	17.9	80.3	69.1	97.4	113.6	62.9	62.1	20.4	方法 I
平均值	29.3	15.3	82.6	72.2	107.9	132.5	65.3	61.4	18.7	方法 V

3.3 垂向观测

由于垂向观测的被测电极同样远离接地电阻测试仪,因而不符合方法 I 的准确测量前提要求,需要比较方法 I 和方法 V 测量江宁台垂向地电观测电极接地电阻结果的误差。在该装置未封井时采用方法 I 进行计算,2018 年 1 月 18 日封井后采用方法 V 进行计算。方法 I 直接使用接地电阻测试仪测量电极的接地电阻,方法 V 根据式(2)代入表 3 中的电缆线电阻计算。计算方法 I 和方法 V 多次测量结果的平均值, A_4 、 M_4 、 N_4 、 B_4 电极的测量结果分别为 31.4%、9.8%、11.2%、3.4%,该误差符合预期,表明方法 I 仅能作为电极状态的初步性能评估,而方法 V 的测量结果更接近电极真实的接地电阻。与井下水平向 2 种方法的测量结果相比,垂向观测电极采用方法 I 测量的结果均小于方法 V(表 5),这可能与垂向观测的特殊布极有关。

表 5 江宁台垂向地电观测电极的接地电阻

井孔	电极	电极深度/m	时间(年-月-日)	接地电阻/ Ω	测量方法
1	A_4	200	2017-10-01	40.0	方法 I
			2018-01-18	45.0	方法 I
			2018-09-19	56.9	方法 V
			2019-09-17	58.6	方法 V
			2019-12-12	56.0	方法 V
	M_4	275	2017-09-30	96.9	方法 I
			2018-01-18	98.0	方法 I
			2018-09-19	108.0	方法 V
			2019-09-17	106.8	方法 V
			2019-12-12	106.4	方法 V
2	N_4	325	2017-09-29	42.0	方法 I
			2018-01-18	47.0	方法 I
			2018-09-19	50.4	方法 V
			2019-09-17	48.4	方法 V
			2019-12-12	49.6	方法 V
	B_4	400	2017-09-29	35.0	方法 I
			2018-01-18	35.0	方法 I
			2018-09-19	36.8	方法 V
			2019-09-17	35.6	方法 V
			2019-12-12	36.2	方法 V

4 讨论

4.1 接地电阻较大原因

地电阻率观测规范中要求地表地电阻率观测的供电电极的接地电阻不应大于 30Ω , 测量电极的接地电阻不应大于 100Ω (下文简称标准)。江宁台地电观测每个电极上部覆盖 5m 厚的细黄土(周围无腐植物新原土), 能够降低电极接地电阻和减少电极与周围介质的孔隙度。以方法 V 多次测试结果的平均值为参考, 江宁台井下水平向地电观测装置电极的接地电阻除 A_2/M_1 、 A_1 、 B_3 电极外均符合标准, 其中, A_1 电极的接地电阻超过标准的 4 倍。江宁台垂向地电观测装置的电极的接地电阻除 N_4 电极外均超过标准, 其中, A_4 电极的接地电阻接近标准的 2 倍。江宁台两套观测装置仅 7 个电极符合标准(表 4、表 5), 而绝大部分井下地电阻率观测台站电极的接地电阻测量结果均符合原地电观测规范要求, 如江苏南京台、海安台、甘肃武都台、天水台、新疆昌吉台。电极接地电阻较大的原因可能与部分井孔的地层湿度、地下介质、填埋介质及电极周围介质的孔隙度有关。据江宁区地铁地震保护工程初步验收报告中钻孔 QZ_1 、 QZ_2 、 ZK_1 和 ZK_2 的柱状图记录显示: 探测区域的岩性分布由浅至深分别为粉质黏土、全风化凝灰岩、强风化凝灰岩、中风化凝灰岩和微风化凝灰岩(表 6)。观测区内岩层单一性较好, 200m 以上深度为微风化凝灰岩(樊晓春等, 2018)。电极布设的填埋介质为钻井施工获取的原地下介质凝灰岩粉末与黄沙搅拌均匀后的石粉(下文简称石粉)。因

此,石粉和电极周围的微风化凝灰岩是江宁台井下地电观测电极的接地电阻较大的原因。对于江宁台明显超过标准电极的接地电阻,如何评价其电极是否稳定可靠?我们认为由于原规范为地表地电观测设计,其介质电阻相对简单,而井下电极周围的介质电阻极其复杂,因此,超出标准并不能简单地认为电极本身的状态不好。

表 6 钻孔 ZK₂ 的岩性描述

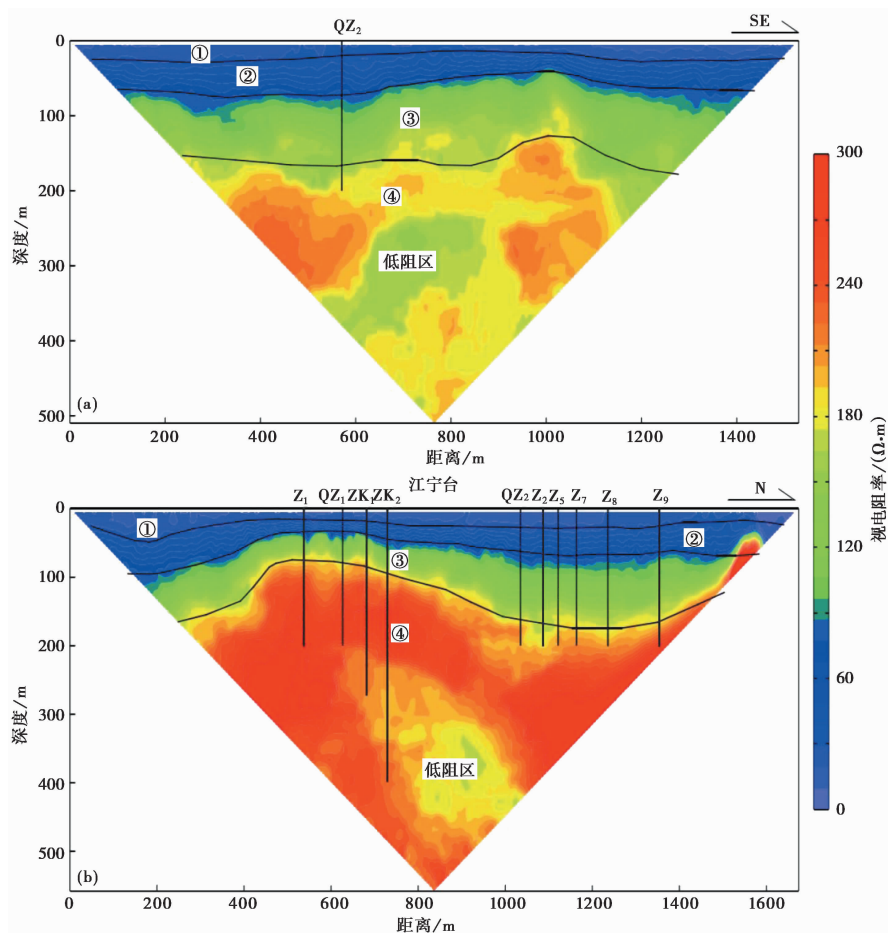
钻孔深度/m	岩性	描述	钻孔深度/m	岩性	描述
1.80	粉质黏土	灰黄色,可塑,切面稍光滑,韧性和干强度中等,表层 20cm 为素填土,含植物根系	145.00	微风化凝灰岩	灰白色,坚硬,凝灰质结构,块状构造,岩芯较完整,呈柱状(5~280cm),裂隙不发育
6.20	粉质黏土	灰黄色,硬塑,切面光滑,韧性和干强度高	197.36	微风化凝灰岩	同上
10.30	全风化凝灰岩	灰黄色,岩石分化成黏土状,夹少量强风化碎块	230.00	微风化凝灰岩	同上
12.00	强风化凝灰岩	灰黄色,坚硬,凝灰质结构,块状构造,岩芯较碎,呈碎裂状	296.00	微风化凝灰岩	灰白色,坚硬,凝灰质结构,块状构造,岩芯较完整,裂隙发育,出水量约为 2.0m ³ /h
37.40	中风化凝灰岩	蓝灰色,坚硬,凝灰质结构,块状构造,岩芯较完整,呈柱状(5~70cm)或碎裂状	400.00	微风化凝灰岩	灰白色,坚硬,凝灰质结构,块状构造,岩芯较完整,裂隙发育,出水量约小于 1.0m ³ /h

4.2 同深度不同电极的接地电阻分析

江宁台井下水水平向观测电极埋深 200m,以方法 V 的多次测量平均值为准,电极的接地电阻变化范围为 15.3~132.5Ω(表 4),其中 A₂/M₁ 电极(Z₂)、A₁ 电极(Z₁)、B₃ 电极(Z₆)的接地电阻超出现有标准。图 2 为测线 L_{NW-SE} 和 L_{NS} 的反演电阻率剖面,可以看出,在 200m 以内,可以将探测区域分为:①浅表覆盖层,岩性为粉质黏土和全风化的凝灰岩层;②强风化层,岩性为中、强风化的凝灰岩;③弱风化层;④微风化层,岩性为弱、微风化的凝灰岩。每层之间具有非常明显的分界面,层内的电性结构基本均匀,但其层厚不均一(唐宝琳等,2018;樊晓春等,2018)。在 200m 处,具有明显的横向变化,存在明显的高电阻率区域和低电阻率区域。沿 L_{NS} 测线附近的钻孔主要有 Z₁、ZK₁、ZK₂、QZ₁、QZ₂、Z₂、Z₅、Z₇、Z₈,其中, A₁ 电极(Z₁)位于高电阻率区域, A₂/M₁ 电极(Z₂)位于高电阻率区域与低电阻率区域交界处, B₃ 电极(Z₆)位于 A₂/M₁ 电极(Z₂)正东方向 75m 处,可能也位于高电阻率区域与低电阻率区域交界处。因此,部分电极位于高电阻率区域或低电阻率区域是井下水平向观测各个电极的接地电阻相差较大的主要原因,但地下电极周围环境极其复杂,还需要进一步讨论。另外,虽然电极布设填埋介质时尽量恢复钻孔前状态,但无法保证各个电极周围填埋介质及其孔隙度相同,从而可能导致各井孔电极的接地电阻存在差异。

4.3 同井孔不同深度中电极的接地电阻分析

江宁台垂向观测 1 号井孔(ZK₁)和 2 号井孔(ZK₂)中各自布设的 2 个电极的接地电阻相差较大,其中,ZK₁ 中 2 个电极的接地电阻变化幅度相差约 1 倍。且位于 1 号井孔(ZK₁)的 A₄ 电极(200m)、M₄ 电极(275m)和位于 2 号井孔(ZK₂)的 B₄ 电极超出现有标准。从测线 L_{NS} 的反演电阻率剖面(图 2)可以看出深度大于 250m 的区域,电性结构并未继承深度小

图 2 测线 L_{NW-SE} 和 L_{NS} 的反演电阻率剖面 (唐宝琳等, 2018)

①粉质黏土和全风化凝灰岩层; ②强-中风化凝灰岩层; ③弱风化凝灰岩层; ④微风化凝灰岩层

于 200m 区域的分层均匀特征, 而是具有强烈的横向变化, 并且存在明显的低电阻率区域 (唐宝琳等, 2018; 樊晓春等, 2018)。故认为 A_4 电极 (200m)、 M_4 电极 (275m) 和 B_4 电极 (400m) 超出现有标准可能与电极位于高电阻率区域有关。

在地震地电观测技术中, 水分对岩石电阻率的影响至关重要。自然界中的岩石均在不同程度上含有一些水分 (或称为岩石的湿度), 在岩石中的孔隙水联通比较好的情况下, 岩石的电阻率主要取决于所含水分的多少。岩石的湿度和岩石本身的孔隙度与当地的水文地质条件有关。麦克斯韦公式和阿契定律表明当岩石的湿度减小时, 岩石的电阻率相应升高。当井深较大时, 压力越大, 电极周围介质的致密性就越好, 透水性则越差, 介质电阻越大。1 号井孔 (ZK_1) 钻孔柱状图显示在井下 75.2~172.0m 和 172.0~275.0m 处裂隙发育, 出水量分别约为 $15\text{m}^3/\text{h}$ 和 $2\text{m}^3/\text{h}$, 认为 M_4 电极处周围介质致密性好于 A_4 电极处, 其透水性较差。因此, M_4 电极的接地电阻大于 A_4 电极。

而位于 2 号井孔 (ZK_2) 的 N_4 (325m) 电极的接地电阻大于 B_4 电极 (400m), 与 1 号井孔 (ZK_1) 相反。1 号井孔 (ZK_1) 和 2 号井孔 (ZK_2) 的钻孔柱状图显示不同深度介质的裂隙发育

不同,表明不同深度介质的湿度可能有差别。 ZK_2 的钻孔柱状图显示在井下 230~296m 和 296~400m 处裂隙发育,出水量分别约为 $2\text{m}^3/\text{h}$ 和小于 $1.0\text{m}^3/\text{h}$ (表 6),认为 N_4 电极和 B_4 电极周围介质的含水量相近,但考虑到 B_4 电极更靠近低电阻率区域(图 2),推测实际上 13 号电极周围介质的含水量可能略大于 N_4 电极。因此,2 号井孔(ZK_2)的 N_4 电极的接地电阻大于 B_4 电极,认为可能与 B_4 电极周围岩石的含水量有关,但地下电极周围环境极其复杂,还需要进一步讨论。

4.4 方法 V 的不足

虽然采用方法 V 可以更加准确地测量电极的接地电阻,但经过多次测试,认为存在一些不足。主要包括:①现有操作流程较复杂,由于台站工作人员业务水平参差不齐,在测量时常出现失误;②未采用独立稳流源,可能影响正常观测;③测试时间较长,因江宁台有 3 套观测装置(地表交流、井下水平、垂向),可用于测量的时间较短;④万用表仪器存在误差;⑤供电时间未作规范要求,供电未完全稳定时可能导致测量结果误差较大;⑥读数时存在人为因素,若保留两位小数会更加准确;⑦因大地的“电容效应”,当 2 次测量间隔时间较短时,2 次结果存在误差,如共用电极。另外,江宁台井下水平地电观测原采用 WL6 电源,后期经过升级,满足了日常观测,供电电流为 1.19A,但在测量电位差时,发现除测量 A_1 和 M_1 2 个电极之间的电位差时供电电流仅 1.0A 左右外,其余均稳定在 1.19 左右,可能与稳流源功率不足有关,具体还需要进一步研究。

5 结论

本文提出了考虑电缆线电阻的加电测试法,采用该方法和原地表采用的接地电阻测试仪测量方法对江宁台的多套地电观测电极的接地电阻进行测量,结果表明:

(1)采用方法 I、方法 V 测量结果的最大变化幅度分别为 17.91%、12.6%,表明后者稳定性略好于前者。

(2)方法 I 要求 E、P、C 在 1 条轴线上且满足 E-P、E-C 等间距,由于半数电极采用 2 种方法的测量结果平均值相差超过 10%,认为方法 I 仅能作为电极状态的初步性能评估,而方法 V 的测量结果更接近电极真实的接地电阻,更适合评估井下观测电极是否稳定可靠。

(3)井深较深时,其回路中电缆线电阻最大达到 7.6Ω ,采用方法 V 时须尽可能考虑电缆线电阻。

(4)采用方法 V 测量垂向观测电极接地电阻的结果均高于方法 I,而水平向采用 2 种方法测量的结果有高有低,其原因可能与垂向观测的特殊布极方式有关。

(5)对于超出现有标准的电极接地电阻,以多次测量结果平均值为基准,依据其变化幅度来判定电极是否稳定可靠更加准确。

(6)同井孔不同深度和同深度不同井孔中电极的接地电阻相差较大,其原因可能与电性结构在 200m 处及以上具有强烈的横向变化、存在明显的低电阻率区域、电极周围的地层湿度及介质的孔隙度等有关。

致谢: 中国地震局兰州地震研究所杜学彬研究员、中国地震局地震预测研究所赵家骝研究员、中国地震局地壳应力研究所王兰炜研究员、江苏省地震局沈红会高级工程师、江宁台地震办公室赵庆福对本文提出了建议和意见,在此表示衷心的感谢。

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.
- 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.
- 高曙德, 郑卫平, 安海静, 等, 2016. 井下地电阻率观测异常核实实例. 地震工程学报, **38**(增刊 II): 240~249.
- 胡哲, 蒋延林, 张秀霞, 等, 2017. 地电观测深井电缆的研制. 中国地震, **33**(2): 338~344.
- 梁浩东, 安海静, 谢宏, 等, 2017. 深井地电阻率观测装置构建及其近场干扰测试. 地震工程学报, **39**(增刊): 127~133, 148.
- 刘昌谋, 桂燮泰, 柴剑勇, 等, 1994. 河源地电台全空间地电阻率实验. 华南地震, **14**(3): 40~45.
- 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.
- 马可兴, 安海静, 王康, 等, 2013. 地电井下观测装置技术指标的测试与认定讨论——井下观测设施构建与测试技术. 西北地震学报, **35**(S1): 143~147.
- 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.
- 唐宝琳, 朱涛, 胡哲, 等, 2018. 江宁地电台的电性结构及关于地电阻率观测值的解释. 地震学报, **40**(4): 481~490.
- 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.
- 中国地震局, 2006. DB/T 18.1-2006 地震台站建设规范 地电观测台站 第 1 部分: 地电阻率台站. 北京: 地震出版社.

Analysis of Electrode Stability of Deep Borehole Geo-electrical Observation at Jiangning Station

Fan Xiaochun¹⁾ Li Wei²⁾ Ye Qing³⁾ Yuan Shenjie⁴⁾ Wang Xin⁵⁾

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

2) Nanjing Seismic Station, Nanjing 210014, China

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

4) Jiangning District Earthquake Office, Nanjing 210014, China

5) Hai'an Station, Jiangsu Earthquake Agency, Hai'an 226600, Jiangsu, China

Abstract Electrode stability is an important index of geo-electrical observation, and usually is evaluated by measuring its earth resistance. In this paper, we analyzed the existing measurement methods, and believed that the method of electrical measurement is more reasonable. An electrical measurement method considering cable resistance then is proposed. Taking Jiangning Station as an example, several methods were used to measure the earth resistance, and compared the result errors from different methods. We found that the electrical measurement method is more suitable for deep borehole observation. Furthermore, we discussed the grounding resistance out of standard and the earth resistance of electrodes at the same depth in different boreholes as well as at different depths in the same borehole, in which the big difference may be related to the formation humidity around the electrode and the porosity of the medium. The disadvantages of electrical measurement method are also analyzed in the paper. Finally, we suggested that when the earth resistance exceeds the standard, the stability of the electrode should be judged by its variation range.

Keywords: Geo-electrical resistivity; Deep borehole observation; Electrical measurement method; Earth resistance