

严兴, 邓志辉, 刘吉平. 地电阻率测量中电极埋深影响的数值模拟研究[J]. 华南地震, 2015, 35(2): 18–23. [YAN Xing, DENG Zhihui, LIU Jiping. Numerical Simulation on the Effect of Apparent Resistivity from Different Depth of Electrode Layout[J]. South china journal of seismology, 2015, 35(2): 18–23.]

地电阻率测量中电极埋深影响的数值模拟研究

严兴^{1, 2}, 邓志辉², 刘吉平²

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 广东省地震局, 广州 510070)

摘要: 结合测区的地质水文资料, 采用有限元分析软件 ANSYS 对河源和平地电台地区建立三维有限元物理模型并进行物理环境变化下的数值模拟实验, 并分别计算了正常状态、地表雨水、挖土施工、地下低阻流体四种情况下真电阻率的变化对观测电阻率的影响, 在四种情况下模拟分析不同的电极埋深对电阻率观测值的影响。结果表明: 电极埋深越深, 对表层电阻率变化越不敏感, 而对深层环境变化反映越明显; 相反, 电极埋深越浅, 越容易受到表层环境的干扰, 而对深层有意义的变化却反映迟钝。

关键词: 深孔电极; 地电阻率; 数值模拟

中图分类号: P315.722 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2015) 02-0018-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2015.02.003

Numerical Simulation on the Effect of Apparent Resistivity from Different Depth of Electrode Layout

YAN Xing^{1, 2}, DENG Zhihui^{1, 2}, LIU Jiping²

(1. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China; 2. Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China)

Abstract: According to the hydrological and geological data of the measurement area, a three-dimensional finite element mode was constructed to simulate Heping geoelectric station and analyze the effect of physical environment on apparent resistivity from different depth of electrode layout. The paper simulates the impact of the resistivity change to the apparent resistivity in the case of the normal state, the surface precipitation, the construction of digging and the underground low resistivity fluid respectively. Under the four situation, the paper analyzes the impact of the apparent resistivity by the different depth of electrode layout. The results show that the deeper the electrode layout, the apparent resistivity is more interfered by the deep environment and less sensitive to the ground-surface conditions; to the contrary, the shallower the electrode layout, the apparent resistivity is more robust to the ground conditions but less sensitive to the deep environment.

Keywords: Deep-hole electrode; Earth resistivity; Numerical simulation

收稿日期: 2014-09-16

基金项目: 广东省省级科技计划项目(2013B020200010)

作者简介: 严兴(1981-), 男, 工程师, 在读博士, 主要从事前兆观测研究。

E-mail: xyan_2004@163.com.

0 前言

我国从 1966 年邢台地震后开始把地电阻率作为一项地震前兆进行观测研究的,它是从直流电阻率法演变而来,通常采用四极对称系统,包括两个供电电极,两个测量极。通常认为,大震孕育的后期,在地下高应力作用下,震源区附近地下岩石的孔隙度会增大,地下裂隙扩展贯通,导致地下流体更多的进入岩石裂缝中,使岩石的电阻率下降,并最终反映到地表观测到的视电阻率上。

多年观测的经验积累表明:震前通常会出现视电阻率变化,地电阻率是一种比较可靠的中短期地震前兆^[1-2]。不过,地表因素(季节,降雨,地表水位及人为等)变化都会影响视电阻率的观测,给前兆判定带来困难。另外,为探测到更深层岩石电阻率的变化,通常采用大极距的观测方式。供电电极距大,导致布极区环境保护的难度加大,经济社会发展与观测环境保护之间的矛盾越来越突出。

深孔地电阻率观测能有效的消除地面干扰,提高观测精度,还可将野外大极距装置改成为庭院内装置,不仅大大降低场地限制,而且降低造价和维护成本^[3-4]。本文采用有限元软件 ANSYS 建立和平地电台的三维有限元模型,通过电阻率参数的改变模拟地表或深层的物理环境变化,通过模拟计算来进一步定量的分析电极埋深的差异在不同干扰条件下对观测电阻率值的影响。

1 和平地电站简介

和平台位于广东省河源市源城区和平村,位于著名的新丰江水库区东南,大坝以东约 6 km 处,河源盆地北东侧,在河源断裂以东约 4 km 处。距离 1962 年河源 6.1 级地震震中约 6 km。该台址地形较平缓开阔,相对高差不大。测区东南角是由侏罗系兰塘群砂页岩组成的低丘台地,地势较缓,多数有植被或耕地;西南东江边一带为亚砂土和砂土组成的阶地,属第四系河流冲积地;其他广泛分布的是由上白垩统地层砂砾岩组成的红岩低丘台地,地势海拔 70 m,最高 123.6 m,高处基岩多数裸露,局部由于风化剥蚀,已削为平地或坳谷。

从测区电测深的结果来看,三条曲线(图 1)总的形态均可视为 H 型。更细致的分层可以发现:黄竹坑 1 号点及石下 2 号点属 KH 型,下山 3 号点可视为 HA 型。在此,为简化讨论,按三层的 H 型处理。三个测点的曲线一开始上升(或变平)显示出受地表面层浮土较高电阻率的影响,接着在基层红层较低电阻率的影响下,曲线下降、转平。在低电阻率范围内变化平缓、宽度较大,显示出其对应的红层厚度较大。然后曲线开始有起有伏地、角度不大地上升,显示出红层以下的高阻岩层对测值的影响。

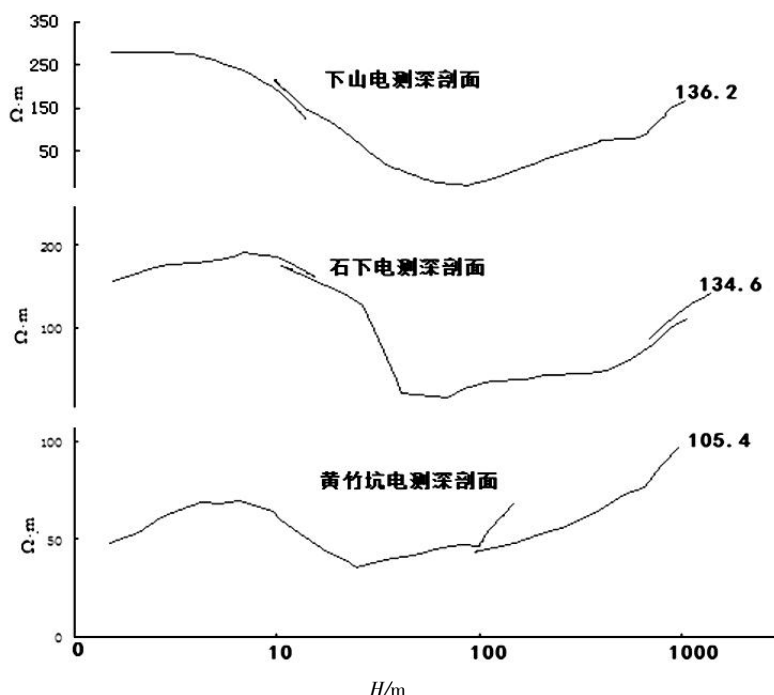


图 1 测区内三点的电测深曲线

Fig.1 Electrical sounding curves in three points of survey area

和平地电站电阻率观测布极方式采用常规的四极对称法,电极用铅板或钢铅混合材料制成空心圆筒形,外线路为架空方式,采用 3 mm 铜包钢线架设,观测仪器为 C-ATS 数字地电仪。共设有三道测线,分别为第一测道(N27°E)长 997 m、第三测道(N80°W)长 1 032 m、深孔测道(N80°W') 54 m。其中 N27°E、N80°W 测道是普通浅埋电极,埋深在 2.5~3 m 之间。深孔测道和第三测道平行,四个电极布设在 60 m 以下的井孔中。四个井孔均为人工机钻井孔,钻探深度 63~65 m,口径 110 mm,井沿至井下 2.62 m 处有钢套管保护,井下 6 m 左右常年有水^[5]。

2 地电阻率资料分析

广东地处华南,受热带亚热带季风气候影响,雨水多且雨季长,表层土壤在雨水的影响下,电阻率会出现下降。因此夏季频繁的降水水会对浅表电极电阻率的测量结果带来不小的影响。另外,深部流体的影响有可能在地表深层形成低阻带,深部低阻带对于不同的电极埋深可能产生不同的影响。

从 2000 年起,由于经济建设快速发展,第一、三测道的地电阻率明显受到环境干扰,测值起伏较大,以往清晰的年变规律被破坏,但第一测道在最近几年仍表现出随着冬天气温降低、天气干燥,测值逐步升高的形态。第一测道在 2012 年 10 月因为附近碧桂园房地产工地施工破坏线路导致测值不稳定,跳跃上升幅度达到了 2.5%。根据台站人员的汇报,在第一测道供电电极 B 和测

量电极 N 之间有两大施工工地(均为碧桂园房地产所有),分别在铺设水泥路和挖地下车库,两个工地和测线的相对位置大概如如图 2 所示。

初步分析 2012 年 10 月份至 2013 年 1 月份的缓慢上升变化应该是测值本身的回升和公路填土工程共同造成。地下车库开挖工程彻底改变了当地的地电环境,首先是去除了高阻的风化土,其次是挖去低阻的沙砾岩,电流则要在一个更大的空间范围形成闭合回路,相应地增加了视电阻率。因此我们采用有限元数值模拟的方式,对地表雨水、挖土施工、地下低阻流体这几种情况分别进行建模和计算,定量的分析其影响。

3 有限元数值分析

为了验证环境变化在电极埋深的不同情况下视电阻率观测值的影响,我们利用有限元分析软件 ANSYS 建立三维有限元模型,分别计算了正常状态、地表雨水、挖土施工、地下低阻流体四种情况下真电阻率的变化对视电阻率的影响。

3.1 建立有限元模型

根据测区的电测深曲线,结合计算误差估计^[6],模型厚度设置为 2 015 m,模型长宽都设置为 3 000m。根据测区的电性结构(表 1),模型共设置 4 层,第一层厚度 5 m 为表层干燥土,电阻率设置为 200 $\Omega\cdot\text{m}$;第二层厚度 10 m 为表层湿润土,电阻率设置为 150 $\Omega\cdot\text{m}$;第三层厚度 500 m 为红层基岩,电阻率设置为 50 $\Omega\cdot\text{m}$;第四层厚度 1500 m 为变质岩,电阻率设置为 150。有限元的网格划分

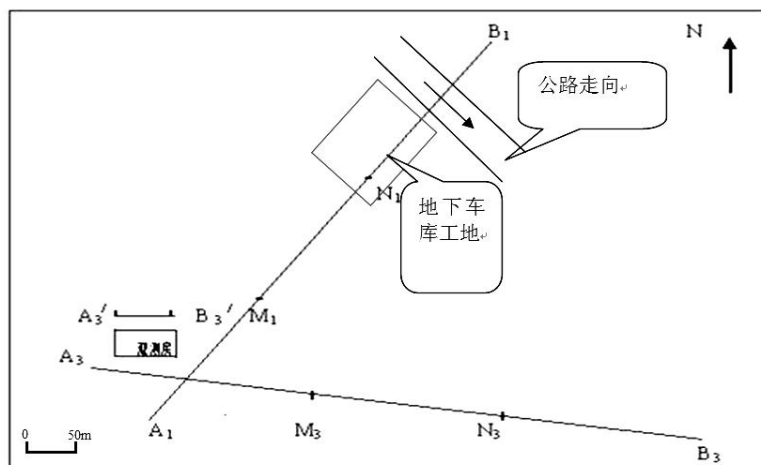


图 2 工地和测道相对位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of relative position between construction site and measuring channel

表 1 测区电性结构数据表

Table 1 The data table of electrical structure in measurement area

测点	项目						拟合误差 /%
	第一层 电阻率/ $\Omega\cdot\text{m}$	表土 厚度/m	第二层 电阻率/ $\Omega\cdot\text{m}$	红层 基岩厚度/m	第一层 电阻率/ $\Omega\cdot\text{m}$	变质岩 厚度/m	
一号测点(黄竹坑)	60~78	5.6	38~65	587	130	前两层以下	2.22
二号测点(石下)	150~240	11.2	43~75	580	160	前两层以下	2.25
三号测点(下山)	113~262	17.4	42~73	580	90~192	前两层以下	2.75

直接关系到计算精度及时间开销，因此我们在中心测区(1 000 m*1 000 m)进行了网格的适当加密，其他周边区域网格划分较稀疏以减少时间开销。模型的水平剖面图如图 3 所示。

整个模型可看做稳恒电流场。在选定的两个

供电极(极距 1 000 m)，即结点 A、B 上分别输入电流+2A 和-2A，表示电流从 A 端流入 B 端流出。从计算结果中查看 M、N 结点(测量极，极距 300 m)的电位差 ΔV_{MN} ，根据电阻率计算公式 $\rho=K \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I}$ ，即可计算视电阻率： $K=\pi \cdot \frac{AM \times AN}{MN}$ 。

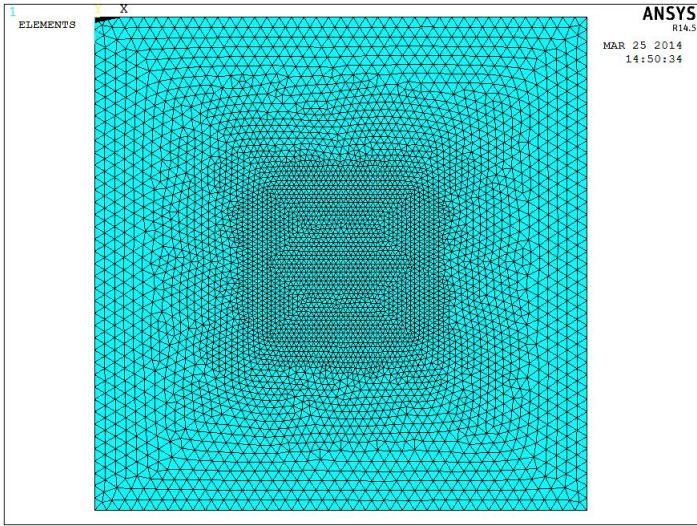


图 3 地电阻率有限元模型水平剖面

Fig.3 Horizontal section of finite element model of earth resistivity

3.2 模拟过程设计

根据影响因素的不同，我们设计了如下 4 类模拟过程：

(1) 正常状态下(即依照电性结构表确定的各层电阻率值)，电极埋深由浅到深逐步变化(埋深分别为 5 m、65 m、115 m、165 m、215 m、315 m，如图 4 所示)所引起的电阻率观测值的变化。这样产生一组 6 个正常状态下的本底值。

(2) 雨季降水增多，会导致表层土的真电阻率降低，我们将表层的电阻率由 200 变为 50，再分别计算电极埋深不同所测量得到的视电阻率，然后跟本底值比较计算其变化率。

(3) 2012 年 10 月份以来，碧桂园的建筑施工工地曾在我们的测道电极之间修建公路，进行了

挖土施工，并修建地下车库，因此我们设计挖土对测量电阻率影响的模拟计算，将测区内 5 m 厚度的表层土移除，然后分别计算电极埋深不同所测量得到的视电阻率，然后仍然跟本底值比较计算其变化率。

(4) 假设震前孕育过程中，地下深部的低阻流体在应力作用下上涌，进入我们的模型区域。我们将第四层最下部的 1 000 m 处电阻率值降低，由 150 减小为 50，然后计算电极埋深不同所测量得到的视电阻率，然后仍然跟本底值比较计算其变化率。

4 模拟结果及结论

在正常状态下，我们模拟计算出一组电阻率

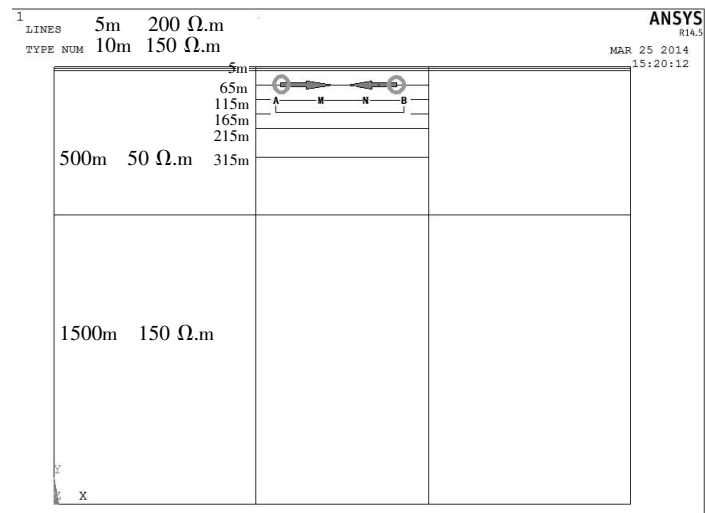


图 4 电极埋深示意图

Fig.4 Schematic diagram of different depth of electrode layout

值，从电极埋深 5 m 的 51.25 $\Omega.m$ 一直到 315 m 的 26.53 $\Omega.m$ 。这是因为在浅表电极情况下，电流更多的穿过地表区域，导致视电阻率较高；而深埋电极则能够实现近似全空间测量，使电流线更多集中于地下，测量深部电阻率，在地下流体的影响下，视电阻率测值较低^[7-8]。

在模拟降雨和挖土影响的二组结果中我们发现，随着电极埋深越来越大，表层电阻率的变化对其影响越来越小，而基岩电阻率的变化对视电阻率观测结果的影响在增大。见表 2 和图 5。特别在表层浅埋电极情况下，表层土壤电阻率的增大或减小反而引起视电阻率观测值的减小和增大，出现

表 2 局部环境变化对电阻率观测值的影响

Table 2 The effect of partial environment variation on apparent resistivity

电极深度/m	正常状态	雨季	变化率/%	挖土	变化率/%	地下流体	变化率/%
5	51.247 4	51.871 0	1.211	50.931 0	-0.623	51.162 38	-0.171 5
65	38.932 2	38.064 4	-2.229	39.174 1	0.621	38.838 21	-0.241 5
115	31.007 9	30.663 4	-1.111	31.087 3	0.256	30.896 48	-0.359 4
165	28.037 2	27.904 0	-0.475	28.058 8	0.077	27.890 39	-0.523 7
215	26.902 6	26.842 3	-0.224	26.905 5	0.011	26.685 72	-0.806 3
315	26.526 6	26.507 8	-0.071	26.523 9	-0.010	25.841 41	-2.583 19

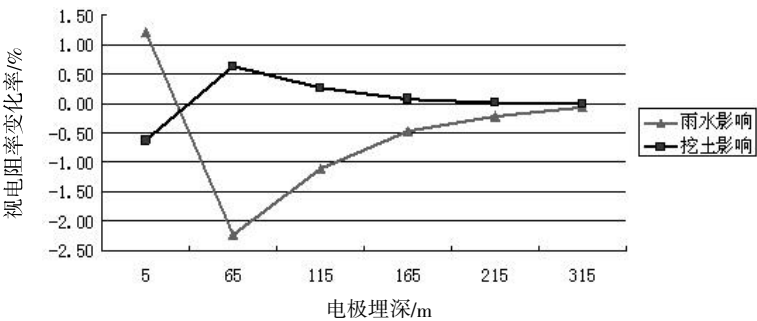


图 5 表层环境变化对不同电极埋深的影响

Fig.5 The effect of surface layer variation on different depth of electrode layout

所谓“负异常”现象^[4]。

在深部低阻流体影响的模拟结果中，我们发现，电极埋深越大，对深部的变化反应越灵敏，而浅表电极则反应微弱，变化率从深到浅由 2.6%降到

0.17%，如图 6。而我们真正关心的正是地壳深部的变化，这种变化最有可能反映地球深部应力场的信息，而此时深埋电极体现出对深部信息反映的灵敏性明显优于浅表电极。

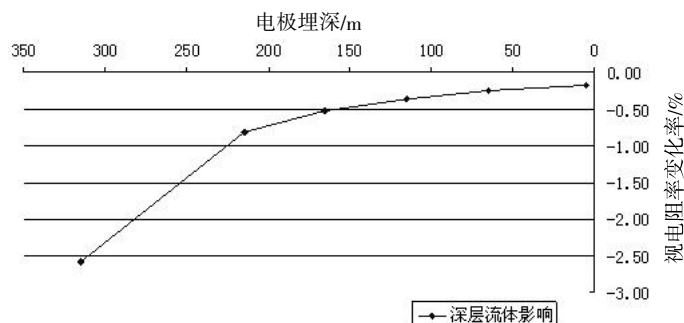


图6 深层环境变化对不同电极埋深的影响

Fig.6 The effect of deep layer variation on different depth of electrode layout

5 总结

通过数值模拟实验,我们发现周围环境变化在电极埋深不同时得到的观测电阻率值有明显区别。电极埋深越大,对表层真电阻率变化越不敏感,而对深层环境变化反映越明显;相反,电极埋深越浅,越容易受到表层环境的干扰,反而对深层的有意义的变化反映迟钝。在当今经济社会发展越来越快的背景下,应多提早布局深层的地电阻率观测。

本实验的模型比较简单,都是采用水平分层的电性结构,与实际情况可能还有差距,采用的电阻率干扰因素也都是取水平整层。在今后的工作中将进一步计算低阻或高阻异常体分布在不同的位置和范围时对观测值的影响。

参考文献:

- [1] 钱复业,赵玉林,于谋明,等.地震前地电阻率异常变化[J].中国科学(B辑),1982(9):831-839.
- [2] 周剑青,郭建芳,朱彦珍,等.地震前昌黎台地电率变化特征分析[J].地震工程学报,2014,36(1):120-126.
- [3] 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.
- [4] 聂永安,巴振宁,聂瑶,等.深埋电极的地电阻率观测研究[J].地震学报,2010,32(1):33-40.
- [5] 陈智群,柴剑勇,李敬,等.和平台深孔电极地电阻率测值趋势下降原因分析[J].华南地震,2014,34(1):117-121.
- [6] 解滔,卢军,李美,等.地埋钢缆对宝昌台地电阻率干扰的定量分析[J].地球物理学进展,2013(2):727-734.
- [7] 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(10):1321-1330.
- [8] 杜学彬,李宁,叶青,等.强地震附近视电阻率各项异性变化的原因[J].地球物理学报,2007,50(6):1802-1810.
- [9] Lu J, Xue S Z, Qian F Y, et al. Unexpected changes in resistivity monitoring for earthquakes of the longmen shan in Sichuan, China, with a fixed Schlumberger sounding array[J]. Phys Earth Planet Interi, 2004, 145: 87-97.