

田山, 刘允秀, 聂永安, 马骥, 庞群英, 杜学彬. 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.

Tian Shan, Liu Yunxiu, Nie Yong'an, Ma Ji, Pang Qunying, Du Xuebin. 2009. Improved method of earth resistivity observation: Transplant application and numerical model analysis of electric well logging technique. *Acta Seismologica Sinica*, 31(3): 272-281.

# 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<sup>\*</sup>

田 山<sup>1),\*</sup> 刘允秀<sup>1)</sup> 聂永安<sup>1)</sup>  
马 骥<sup>1)</sup> 庞群英<sup>1)</sup> 杜学彬<sup>2)</sup>

1) 中国天津 300201 天津市地震局

2) 中国兰州 730000 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地

**摘要** 现有的地震地电阻率观测系统需要较大的环境保护区( $2\text{--}5 \text{ km}^2$ ). 随着各地的经济发展, 地电观测的环境受到越来越大的影响, 造成部分台站连续多年的地电前兆观测受到严重的干扰. 为了减小观测环境保护区范围, 有效地抑制来自地面的观测环境改变及城市地铁、轻轨运行时漏电产生的干扰, 提出了将三侧向石油电测井技术移植到地震地电阻率前兆监测领域, 以提高地电前兆观测的抗干扰能力和前兆信息的监测能力. 电测井有限元数值模型的计算结果表明, 该方法可有效测量出地层的电阻率变化, 对来自地表的干扰有较强抑制能力. 分析还表明, 该方法可有效抑制来自轻轨、地铁的漏电干扰.

**关键词** 地震地电阻率观测 环境干扰 电测井技术 移植改造 有限元分析

**文章编号:** 0253-3782(2009)03-0272-10    **中图分类号:** P315.72<sup>+</sup>2    **文献标识码:** A

## Improved method of earth resistivity observation: Transplant application and numerical model analysis of electric well logging technique

Tian Shan<sup>1),\*</sup> Liu Yunxiu<sup>1)</sup> Nie Yong'an<sup>1)</sup>  
Ma Ji<sup>1)</sup> Pang Qunying<sup>1)</sup> Du Xuebin<sup>2)</sup>

1) Earthquake Administration of Tianjin, Tianjin 300201, China

2) Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake  
Administration, Lanzhou 730000, China

**Abstract:** Current earthquake ground resistivity observation system demands large environmental protection area ( $2\text{--}5 \text{ km}^2$ ). Along with regional economic development, ground resistivity observation environment has suffered more and

\* 基金项目 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAC01B02-04-03)和天津市科技支撑计划重点项目(07ZCGYSF03100)资助.

收稿日期 2008-05-13 收到初稿, 2008-12-15 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: ts520739@sina.com

more disturbance, resulting in severe interference in the ground resistivity precursor observation at some stations for many years. In order to reduce the range of environmental protection area and effectively suppress the interference due to environment change and electric leakage from city subway and light railway running, this paper proposes to transplant the 3 lateral component electric well logging technique in petroleum exploration to earthquake ground resistivity precursor observation, thus to enhance the anti-interference ability of ground resistivity observation. We simulated the electric well logging with a finite element model. The model calculation result shows that the method can efficiently simulate ground resistivity variation in different strata, and can suppress the strong interference coming from ground surface. The result also shows that this method can effectively avoid suffering from electric leakage interference of city subway and light railway.

**Key words:** earthresistivity observation; environmental interference; electric well logging technique; transplant; finite element analysis

## 引言

我国地震地电观测台大多始建于 1970 年前后, 其中部分台站至今已连续观测近 40 年, 并在大地震前后显示出与地震活动有关的变化, 积累了长期观测资料和一定的强震震例, 使该项前兆观测结果成为震情判断(特别是强地震震情判定)的重要依据。

目前, 国内的地震地电阻率观测技术多采用对称四极法, 其供电电极和测量电极的埋深为 2 m 左右, 供电极距多为 1000—2000 m。这一观测系统占地面积大, 需要环境保护区的范围达 2—5 km<sup>2</sup>。较大的保护区使部分地电台站观测环境保护的问题严重影响了农村经济结构的调整, 防碍了农民收入的提高。随着近年来我国经济建设的腾飞, 特别是乡镇的城市化扩张与发展, 使已连续观测多年的地震地电阻率前兆观测受到较大干扰, 在邻近城区的大部分台站, 人类活动造成的干扰信息可能会超过地震产生的前兆信息, 地震地电阻率观测资料不能有效地对地震进行监测及其进行相关的研究工作。

为解决地震地电阻率观测与当地经济发展的矛盾, 本文作者通过对国内外现有的井下(吉野登志男, 行武毅, 1981; 刘允秀等, 1985; 陈宝华, 1985; 苏鸾声, 1982)及深井(刘昌谋等, 1994; 孙承德等, 1996, 1998; 孟庆武, 阎洪朋, 1991)地电阻率观测技术的详细的调研、论证和分析, 从中选择出监测能力和排除环境干扰俱佳的方案, 提出一种能够有效避开地面干扰, 取得地震监测预报实效的地电观测的改进方法, 即通过移植和改造, 将电测井技术应用到地震地电阻率前兆监测领域。

电阻率法测井是根据岩石导电能力的差异, 在钻孔中研究岩层性质和区分它们的一套测井方法。它包括普通电极系电阻率法测井、微电极系测井、侧向测井及感应测井等方法。

电测井的创始人是康拉德·斯伦贝谢(Bill, Rhonda, 2002)。此项技术工作原理很简单(图 1), 用 3 根绝缘电线将 3 个电极 A, M 和 N 下到井筒底部, 来自电极 A 的电流流过钻井泥浆并分散到地层中, 在 M 和 N 两点测得的电势被传到地面, 并记录下来。通过测量 M 和 N 两点的电位差和来自 A 点的电流强度, 计算出地层的视电阻率。

然而, 当地层的电阻率很高, 或者在盐水泥浆的情况下, 由于泥浆电阻率很低, 使得

电极流出的电流大部分都在井内的泥浆中流过，进入测量层的电流很少。因此测量的视电阻率曲线变化平缓，不能用来划分地层、判断岩性。另外，在沙泥岩交互层地区，高阻临层对普通电极系的屏蔽影响很大，使其难以求出地层真电阻率。

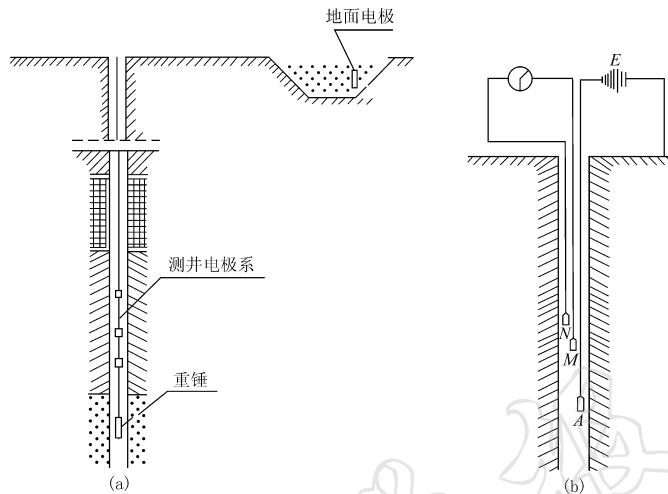


图 1 电测井示意图(引自李舟波, 2006)

(a) 电测井装置系统; (b) 电测井线路图( $AB$ : 供电电极,  $MN$ : 测量电极)

Fig. 1 Sketch map of electric well logging

(a) System of electric well logging; (b) circuit diagram of electric well logging  
( $AB$  are poles for power supply,  $MN$  are measuring poles)

为解决上述的问题，就出现了带有聚焦电极的侧向测井。它能使主电流成一定厚度的平板状电流束，垂直进入地层，使井的分流作用和围岩的影响大大减少。

本文将探讨侧向测井技术中的三侧向电测井沿井孔的连续探测转为在井下固定位置对岩层电阻率的实时探测，用来监测特定地层的电性随地应力的改变而发生的变化，从而达到检测地震前兆的目的。以下采用数值仿真模型对三侧向电阻率测井方法的响应能力(即特定地层的电阻率变化的监测能力)、抗干扰能力进行定量的分析。

## 1 电阻率三侧向测井技术简介

三侧向测井全称为三电极侧向测井。其电极系由 3 个柱状金属电极组成，主电极  $A_0$  位于中间，比较短。屏蔽电极  $A_1$  和  $A_2$  对地排列在  $A_0$  的两端(李舟波, 2006)，电流回路电极  $B$  位于地表。电极系装置及测井时通过电极系和岩体的电流分布见图 2a 所示(李舟波, 2006)。测井过程中，由一电源提供的电流  $I_0$  流过主电极  $A_0$ ，进入岩体并通过岩体到达回流电极  $B$ ，形成串联回路，称为主回路；另一套电源提供电流  $I_s$ (图中未显示)通过电极  $A_1$  和  $A_2$ ，并通过岩体到达  $B_1$  分别在主电流上下两侧形成两条对称的电流回路(调整回路)。线路的连接可以保证在岩体中两种电流( $I_0$  和  $I_s$ )的流向相同，并使  $A_1$ ， $A_0$  和  $A_2$  三个电极上的电位相等，从而在一定程度上使主回路在岩体中的电流  $I_0$  能在岩体中不致很快发散，即在水平方向上相对集中并更多地深入岩体内部，从而实现对岩体的有效检测。实际装置中，为了保证这个条件的实现，电极  $A_1$  和  $A_2$  导线相连接，从而保证了图 2 中电流  $I_s$  的对称性以及主回路电流的集中性。在测井过程中当装置处于不同电性层界面时， $A_1$ ， $A_0$  和

$A_2$  三个电极的电位可能不相等, 而上述调整电路可以作出调节, 以确保上述要求成立。这是这个电路被称为调整电路的原因。由于  $A_1$  和  $A_2$  的存在对主回路电流的发散起到了阻碍或屏蔽作用, 因此这两个电极又称为屏蔽电极。

由主回路的电路图(图 2)可知, 从主电极  $A_0$  流过岩体之间的电阻  $r_0$  由欧姆定律所确定

$$E = I_0 R + I_0 r \quad r_0 = \frac{E - I_0 R}{I_0} = u = \frac{U_A - U_B}{I_0} = \frac{U_A}{I_0}$$

式中,  $E$  为主回路电压;  $r_0$  为主电极  $A_0$  的接地电阻, 即由主电极到回路电极所经过的介质的电阻。根据物理学基本原理, 流过固定体积的电阻  $r_0$  与体积的几何尺度有关, 有

$$r_0 = \frac{\rho}{K}$$

在井孔测量的实际情况下, 电阻率  $\rho$  以视电阻率  $\rho_s$  表示, 有

$$\rho_s = K \frac{U_A}{I_0} = K \frac{U}{I_0} \quad (1)$$

式中,  $\rho_s$  是电流通过地层电阻率数值的综合反映, 称为视电阻率;  $U=U_A$  为主电极对地面回流电极  $B$  的电位(设  $U_B=0$ ), 单位为 V;  $I_0$  是主电流强度, 单位为 A;  $K$  是与观测视电阻率装置有关的量纲为长度的几何因子, 称为三侧向电极系系数(单位为 m), 是与仪器的构造性状及尺寸有关的常数, 可用理论计算方法获得(李舟波, 2006), 也可用实验方法求出。例如, 在远比电极系装置尺度大的水槽中, 用该装置对已知电阻率的水进行检测, 便可以求得。

公式(1)也可以表达为下式, 则

$$\rho_s = Kr_0 \quad (2)$$

即视电阻率的大小反映了主电极的接地电阻的大小。因此, 三电极侧向测井过去曾叫做屏蔽电极测井或屏蔽接地电阻法测井。

根据接地电阻的定义, 它应与电流通过的空间所有介质的电阻率都有关。对于侧向测井来说, 由于聚流作用, 主电极电流不能很快分散, 因此它的接地电阻能与较远的介质有关, 即聚流作用愈好, 侧向测井的探测范围愈大。

由于主电极电流成薄片状水平进入地层, 它的接地电阻可以看作是电流片范围内井内泥浆电阻  $r_m$ 、侵入带电阻  $r_i$  和地层未被侵入部分的电阻  $r_t$  在水平方向上串联起来的结果

$$r_0 = r_m + r_i + r_t \quad (3)$$

画成等效电路, 如图 3 所示。

$r_m$ ,  $r_i$  和  $r_t$  各部分对  $r_0$  的影响大小, 一方面与各部分介质的电阻率及径向深度有关, 另一方面还决定于电极系本身的聚流能力。因此电极系聚流能力强时, 电流片在不明显散

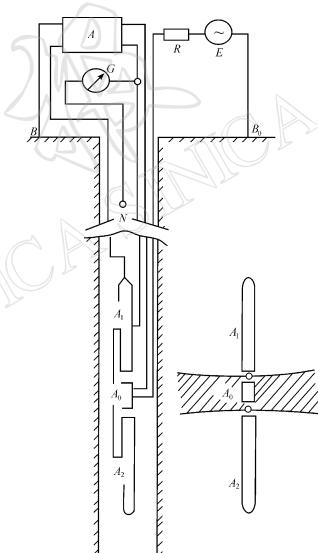


图 2 三侧向电极系及测量原理图

(引自李舟波, 2006)

Fig. 2 Three lateral electrode configuration and survey schematic diagram

开的情况下能进入地层较远的地方, 所以  $r_0$  对  $r_t$  的相对贡献就增加,  $r_m$  和  $r_i$  的影响就相对减小; 相反, 当电极系聚流能力差时,  $r_0$  对  $r_t$  的贡献就相对地减小,  $r_m$  和  $r_i$  的影响就增大.

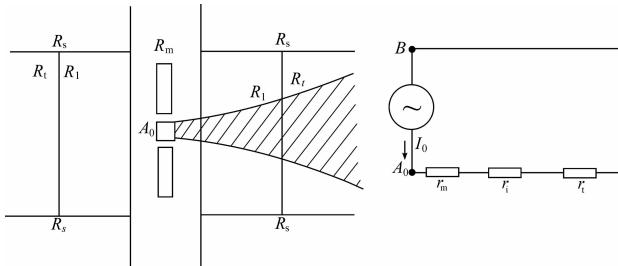


图 3 主电流通过的介质及其等效电路

Fig. 3 The medium with main current passing through and its equivalent circuit

## 2 有限元算法及数值模型

### 2.1 电磁有限元分析平台

有限元方法是用有限个单元将连续体离散化, 通过对有限个单元作分片插值求解各种力学、物理问题的一种数值方法. ANSYS 是目前应用广泛、通用性强、效果显著的有限元分析系统. 本文采用该系统作为地层电性变化的数值模拟分析的基础平台, 其电磁场分析的基础是麦克斯韦(Maxwell)方程组. 有限元方法计算的未知量(也称自由度)主要是磁位和电位, 其它诸如磁场的通量密度、电流密度、能量、力、损耗、电感和电容可以由这些自由度导出.

ANSYS 工程电磁分析过程有 5 个步骤: ① 创建物理环境; ② 建立模型、划分网格、对模型的每个区域赋予特性; ③ 施加边界条件和载荷(激励); ④ 求解; ⑤ 观察分析结果.

### 2.2 数学模型

由式(1)可知, 求视电阻率  $\rho_a$  的关键在于得到主电极上的电位值  $U$ , 为此必须求得整个电场中的电位分布函数  $U(x, y, z)$ . 因为主电极和屏蔽电极发出的都是稳定电流, 所以问题的关键是确定一个由稳定电流产生的电场中的电位分布函数  $U(x, y, z)$ . 根据地电阻率法的原理(钱家栋等, 1985), 介质中稳定电流场属于静电场, 在分区均匀介质内部, 即在每一个电阻率等于常数的区域内部的任一点, 其电位  $U(x, y, z)$  满足拉普拉斯方程

$$\nabla^2 U = 0 \quad (4)$$

在任意两个分区的界面上, 应满足边值关系

$$U_i = U_j \quad \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial U_i}{\partial n} = \frac{1}{\rho_j} \frac{\partial U_j}{\partial n} \quad (5)$$

式中,  $\rho_i$  和  $\rho_j$  分别是相邻两个分区的电阻率;  $U_i$ ,  $\frac{\partial U_i}{\partial n}$  及  $U_j$ ,  $\frac{\partial U_j}{\partial n}$  分别是在分区界面两侧各分区的电位及电位在法向上的方向微商.

此外, 应在井壁上和地面上满足边界条件:  $\partial U / \partial n = 0$ ; 在远离井壁处满足无穷远条件:  $U_\infty = 0$

### 2.3 ANSYS 分析

由于对称性,本文研究的地层数值模型结构如图4所示。其尺寸为高120 m,宽50 m。为便于网格划分及减少计算量,在求解区域外添加了远场围岩和地层,求解区域的地层模型厚度从上往下分别为35 m、20 m和35 m,远场围岩和地层为15 m。井眼在最左边,井眼半径为0.1 m,仪器(电极系,下同)半径为0.0445 m,井眼中的仪器已被挖去(图5)(孙明礼等,2007)。

有限元分析(finite element analysis)的基本概念是用较简单的问题代替复杂问题后再求解。它将求解域看成是由许多称为有限元的小的互连子域组成,对每一单元假定一个合适的近似解,然后推导求解这个域总的满足条件,从而得到问题的解。因为实际问题被较简单的问题所代替,所以这个解不是准确解,而是近似解。有限元不仅计算精度高,而且能适应各种复杂形状,因而成为行之有效的工程分析手段。

有限元网络划分是将求解域近似为具有不同有限大小和形状,且彼此相连的有限个单元组成的离散域。划分的单元越小则离散域的近似程度越好,计算结果也越精确。

为此,本文使用电磁场分析的h方法进行模型计算,即提高井孔附近仪器所在区域设定分割的单元数,网格划分后使地层靠近仪器的区域密度大(最小网格宽度为0.011 m)。网格划分后的有限元模型如图6所示。

选用地层模型的有限单元类型为Plane67热-电耦合实体单元。本单元有4个节点,每个节点两个自由度:温度和电压,只能用于稳态电分析。该单元材料性能参数为电阻率值,输出值为电压,参数设置比较简单。

设定有限元模型的上、下及右边

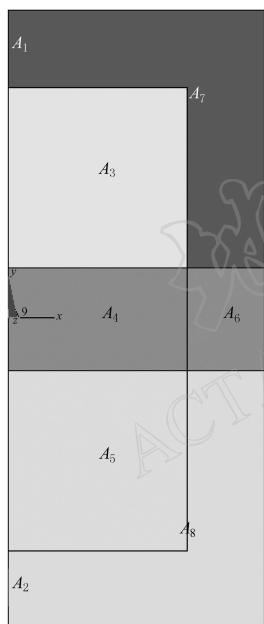


图5 地层几何模型

Fig. 5 Geometrical model of the stratum

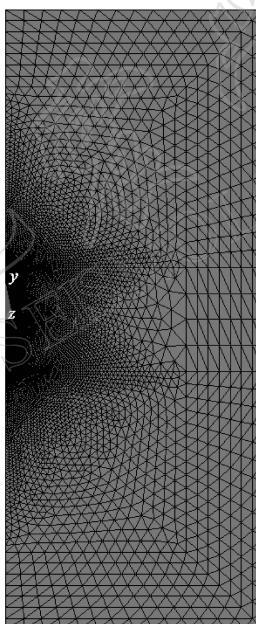


图6 地层有限元模型

Fig. 6 Finite element model of the stratum

缘为无穷远边界,加载求解时该边界处的 $V=0$ 。

### 3 三侧向测井方法对地层电阻率变化的响应程度分析

与目前广泛应用于地震前兆观测的传统地电阻率测量一样,除了测量系统的干扰(如仪器故障、线路漏电等)引起的变化外,三侧向地电阻率测井方法观测到的视电阻率变化,

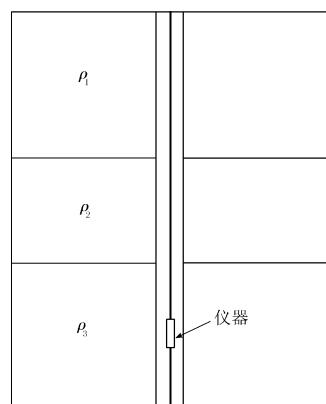


图4 地层模型

Fig. 4 Stratum model

主要是来自测区内地下地层的电性变化.

对地层电性变化响应的程度, 是开展地震地电观测的关键, 响应程度越高, 其方法就越有效. 由于电测井技术是深入到地层中进行电阻率变化测量, 所以该方法比以往的地表半无限空间对称四极观测得到更直接的地层电性变化信息.

为了充分论证该方法对地层电阻率变化的响应程度, 本文对前面建立的地层数值模拟模型进行了3层地层模式的4种电性剖面的模拟计算.

以下是利用有限元方法对三侧向测井电极系的地层电阻率变化响应程度的计算结果.

1) A型断面( $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ ). 为了后面的对比分析, 该3层地层电阻率值的设置以宝坻台现台址的电测深结果, 其各层的电阻率值分别为:  $\rho_1 = 28 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2 = 36 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3 = 165 \Omega \cdot m$ . 考虑到地震地电阻率前兆观测的特点是完井后多年的连续固定位置测量, 故将数值模拟模型中井孔泥浆的电阻率值设定为具有代表性的低矿化度的淡水的电阻率值  $\rho_{\text{泥浆}} = 15 \Omega \cdot m$ , 设定远场围岩和地层的电阻率值  $\rho_{\text{远场}} = 15 \Omega \cdot m$ , 以下分析的不同断面类型也采用这一设置. 首先计算出模型的初始值测井曲线, 将同层位的各个不同位置的测井视电阻率值取均值, 代表该层的计算结果; 然后将以上各层的电阻率值减少10%, 以表示地层的电阻率发生了变化, 再用同样的方法进行计算和处理, 得出改变后的计算结果. 由模型的地层电阻率变化前、后的模拟计算结果得到改变量, 与地层电阻率的实际改变量之比即为两者之间的响应程度. 计算结果见表1.

由该断面的计算结果可见, 3层地层的电阻率值改变后, 各层电阻率变化后的响应程度是实际地层改变量的85%—86%.

2) Q型断面( $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ ). 以同样的方法, 建立Q型地层断面模型, 各层地层的电阻率值分别设定为:  $\rho_1 = 60 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2 = 40 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3 = 20 \Omega \cdot m$ , 计算结果见表2.

该断面的计算结果与A型断面比较一致, 3层地层的电阻率值改变后, 各层电阻率变

表1 A型断面三侧向测井视电阻率模拟计算实测结果

Table 1 Modeled measurement of the apparent resistivity of 3 lateral-trode electric well logging on type A section

单位:  $\Omega \cdot m$

层数	地层电阻率值	模型计算结果	电阻率改变-10%	改变后的计算结果	改变前、后模型计算结果的差值	响应程度
1	28	26.0	2.8	23.6	2.4	86%
2	36	33.2	3.6	30.1	3.1	86%
3	165	139.5	16.5	125.5	14.0	85%

注: 响应程度定义为: (初始地层电阻率值的模型计算值-(电阻率改变-10%)后的模型计算值)/地层电阻率实际设定改变值, 下同.

表2 Q型断面三侧向测井视电阻率模拟计算实测结果

Table 2 Modeled measurement of the apparent resistivity of 3 lateral-trode electric well logging on type Q section

单位:  $\Omega \cdot m$

层数	地层电阻率值	模型计算结果	电阻率改变10%	改变后的计算结果	改变前、后模型计算结果的差值	响应程度
1	60	52.20	6.0	47.10	5.10	85%
2	40	36.29	4.0	32.86	3.43	86%
3	20	19.19	2.0	17.49	1.7	85%

化后的响应程度是实际地层改变量的 85%—86%.

3) H 型断面( $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ ). 用同样的方法, 建立 H 型地层断面模型, 各层地层的电阻率设定值分别为:  $\rho_1 = 15 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2 = 3.5 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3 = 20 \Omega \cdot m$ , 计算结果见表 3.

表 3 H 型断面三侧向测井视电阻率模拟计算实测结果

Table 3 Modeled measurement of the apparent resistivity of 3 lateral-trode electric well logging on type H section

单位:  $\Omega \cdot m$

层数	地层电阻率值	模型计算结果	电阻率改变 10%	改变后的计算结果	改变前、后模型计算结果的差值	响应程度
1	15	14.15	1.5	12.74	1.41	94%
2	3.5	5.62	0.35	5.06	0.56	160%
3	20	18.1	2.0	16.3	1.8	90%

本断面第二层地层电阻率改变后, 模型计算的视电阻率的变化量与该层电阻率的实际改变量相差较大, 其原因可能是由于井孔泥浆电阻率设定值远高于该层电阻率设定值的影响所致.

4) K 型断面( $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ ). 用同样的方法, 建立 K 型地层断面模型, 各层地层的电阻率设定值分别为:  $\rho_1 = 15 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_2 = 35 \Omega \cdot m$ ,  $\rho_3 = 20 \Omega \cdot m$ , 计算结果见表 4.

以上 4 种模型的计算结果只是为了表明当地层电阻率改变时, 该项测量技术对变化量的监测能力. 对其它诸如不同断面对地层电阻率变化反映的特征, 以及井孔泥浆的电阻率值的设置对不同断面计算结果的影响等, 由于情况比较复杂, 受篇幅限制, 暂不作讨论.

表 4 K 型断面三侧向测井视电阻率模拟计算实测结果

Table 4 Modeled measurement of the apparent resistivity of 3 lateral-trode electric well logging on type K section

单位:  $\Omega \cdot m$

层数	地层电阻率值	模型计算结果	电阻率改变 10%	改变后的计算结果	改变前、后模型计算结果的差值	响应程度
1	15	14.90	1.5	13.41	1.49	99%
2	35	30.30	3.5	27.27	3.03	89%
3	20	19.11	2.0	17.20	1.91	96%

上述计算结果表明, 当地层电阻率改变时, 三侧向测井方法在各地层位置最少可测出电阻率改变量的 85% 以上. 因此, 该方法可以有效监测地层电性变化.

#### 4 三侧向测井方法对地表干扰的抑制能力

提出改进现有的地电阻率方法的原则, 一是尽量缩小观测环境保护区范围, 有效排除来自经济建设、城市扩张、工农业发展带来的地表干扰, 如深埋电极全空间地电阻率观测方法、竖井地电观测方法等; 二是有效地提取地电阻率异常信息.

本文以地电阻率观测台站测区内的养牛场建设造成的低阻区为例, 进行有限元数值模拟研究. 以青光台为例, 养牛场建在对称四极地电阻率观测系统的中心点一侧, 实际干扰变化量为 1%—2%, 视电阻率变化为下降 1.3—2.5  $\Omega \cdot m$  左右. 在模型计算时将上节建立的地层模型的上层围岩定义为因地表干扰源影响较大产生的高导层. 该层的电阻率设定值由上节计算时的 15.0  $\Omega \cdot m$  改变为比较极端的情况 1.0  $\Omega \cdot m$ , 然后用三侧向电测井方法对

3 层地层的 4 种断面类型分别进行计算。表 5 给出了 3 层地层的各种断面三侧向测井方法模拟地表干扰的计算结果。由表 5 可见，每个断面的各层视电阻率计算值的地表干扰变化，随着电极系在井孔中的深度增加而显著减小，除了 A 型断面因地层的电性差异太大而使计算结果产生较大变化外，其它断面第三层地层(目的层)的影响均小于 1%。由此可知，三侧向测井方法对于来自地表的干扰具有较强的抑制能力。

表 5 三层地层各种断面三侧向测井方法模拟地表干扰的计算结果  
Table 5 Modeled ground interference on each type section of a 3 layer stratum  
measured by 3 lateral-trode electric well logging

单位:  $\Omega \cdot m$

断面类型	电阻率值			改变量		
	1 层	2 层	3 层	1 层	2 层	3 层
A	28	36	165	0.052306	0.035542	0.024931
Q	60	40	20	0.061351	0.01781	0.004456
H	15	3.5	20	0.020675	0.01057	0.007091
K	15	35	20	0.060633	0.028332	0.007123

另外，该方法可有效抑制来自轻轨、地铁的漏电干扰。一般情况下，如前所述，按三侧向电测井的原理，测井前，主电极和两对屏蔽电极不发出电流，此时主电极和两对屏蔽电极上的电位为 0；测井时，主电极  $A_0$  发出恒定电流  $I_0$ ，并通过两对屏蔽电极  $A_1(B)$  和  $A_2(B)$  发出极性相同的稳定电流  $I_1$  和  $I_2$ ，主电极和两对屏蔽电极的电位保持一致。

因为主电流  $I_0$  保持恒定，故测得的  $A_0$  电极表面的电位  $V$  依赖于地层电阻率  $\rho_s$  的数值，漏电电流不可能改变地层地电阻率，所以不会改变  $A_0$  电极表面的电位  $V$ ，也就不可能影响地层电阻率  $\rho_s$  的数值。

从观测系统的布极方式看，传统的地电阻率测量是水平方向布极，测量电极的极距在 200 m 以上，与漏电电流的传播方向或平行或成一定角度，所以漏电电流在两测量电极间将产生附加电位，使电阻率  $\rho_s$  的观测数值发生正负脉冲型突跳变化。而三侧向电测井技术是与地面垂直方向布极，整个电极系长 3.6 m，主电极长 0.15 m，置于漏电电流产生的电场等位线上，因此不会产生附加电位，也就不会影响地层电阻率  $\rho_s$  的数值。

## 5 三侧向测井方法与其它电阻率观测方法比较

通过调研国内外相关的地电阻率观测(井下观测、电测井)方法及研究成果表明，在排除地表干扰效果上有一定成效的地电观测方法，即井下地电观测技术主要有以下几种方式：① 全空间地电对称四极地电阻率观测方法；② 单井垂向对称四极地电观测方法；③ 井下电极水平对称四极地电阻率观测试验；④ 三极电测井方法。

下面利用上述初步计算结果简要对比三侧向测井方法与这几种地电观测方法消除地表干扰的能力及其适应的电性构造条件：

1) 与地下全空间及深埋电极的比较。由于三侧向测井方法解决了观测过程中井孔低阻泥浆的分流作用，使测量电极的电流直接流向被测地层。在长期连续进行地层视电阻率观测时，观测结果受断面电性类型的影响很小。

而其它方法(如全空间地电阻率观测方法)仅适用于测深曲线为 H 型的地表层电阻率为高阻层的电性条件，当地表层的电阻率为低阻时抗干扰能力不理想。

此外, 刘允秀等(1985)分析了5个地电台深埋电极(井下电极水平对称四极)地电阻率观测的实验结果。分析表明, 对于高阻屏蔽层埋藏很浅以及与表层电阻率差异很大的电性剖面, 深埋电极电阻率观测能够部分或全部排除表层电阻率变化对测量的干扰。反之, 对高阻屏蔽层埋藏较深, 或与表层电阻率差异不大的电性剖面效果则不明显。

2) 与单井垂向对称四极或三极电测井方法比较。首先, 这两种方法没有办法排除井孔中低阻泥浆在供电时的分流作用, 使测量精度下降; 再者这类测量装置由于必有一个电极在地表面或邻近地表, 因此不能有效抑制地表干扰。

3) 三侧向测井方法只需要一根多心电缆, 连接一个三侧向测井电极系置入井中, 而其它测量方法至少需要3条电缆、3个传感器。三侧向测井方法不仅减少了电缆和传感器的使用量, 而且降低了日常维护的难度。

4) 电阻率测井的仪器设备、井孔可长年重复使用, 便于维护, 不浪费井孔资源。

5) 经分析认为, 三侧向测井方法可有效抑制来自轻轨、地铁的漏电对电阻率观测产生的脉冲干扰。

## 6 结论

通过对调研结果的分析及对三侧向电测井方法对电阻率观测的响应能力、抗干扰能力的有限元计算结果表明, 该方法具有能大大缩小观测环境保护区范围, 对地电阻率变化信息的测量响应程度高, 以及对来自地表的干扰有较强抑制能力等优点, 是所调研的地电观测方法中最适用于地震前兆监测的方法。另外, 三侧向电测井方法理论和技术成熟, 设备比较简单, 便于地震地电阻率监测的移植和改造。

考虑到移植改造后的三侧向电测井技术是地震地电观测将电极系投放在井孔中的固定位置长期连续地观测地层电阻率的变化, 所以可使用多个电极系投放在井孔不同深度的地层位置, 实现多层次地层电阻率的同步观测。

综上, 就目前的技术水平而言, 三侧向石油测井技术的移植应用是比较容易实现的方法, 建议在有条件的台站建立实验站进行实际观测应用研究。

## 参 考 文 献

- 陈宝华. 1985. 福州地震台竖井电阻率测量[C]//钱复业, 赵玉林, 陈英方主编. 地震预测: 地电方法论文集. 福州: 福建科学技术出版社: 313-317.
- 李舟波. 2006. 钻井地球物理勘探[M]. 北京: 地质出版社: 1-46.
- 刘昌谋, 桂燮泰, 柴剑勇, 秦乃岗, 李发国, 黄道立. 1994. 河源地电台全空间地电阻率试验[J]. 华南地震, 14(3): 40-45.
- 刘允秀, 吴国有, 王蕃树, 王邦本. 1985. 深埋电极地电阻率观测的实验结果[C]//钱复业, 赵玉林, 陈英方主编. 地震预测: 地电方法论文集. 福州: 福建科学技术出版社: 206-216.
- 孟庆武, 阎洪朋. 1991. 临沂台深井电阻率异常变化与地震的关系[J]. 西北地震学报, 13(4): 70-74.
- 吉野登志男, 行武毅著. 1981. 钱复业译. 1983. 山崎断层井下电阻率的连续观测[J]. 世界地震译丛, (2): 55-62.
- 钱家栋, 陈友发, 金安忠. 1985. 地电阻率法在地震预报中的应用[M]. 北京: 地震出版社: 48-49.
- 苏鸾声. 1982. 井下电极观测地电阻率排除地面干扰的实验[J]. 地震学报, 4(3): 274-279.
- 孙承德, 顾贞庆, 钟国芬, 王宝银. 1998. 莒县深井电阻率异常与地震[J]. 地震研究, 21(3): 277-281.
- 孙承德, 顾贞庆, 钟国芬. 1996. 深井电阻率所处井孔位置与地震关系的研究[J]. 西北地震学报, 18(4): 74-76.
- 孙明礼, 胡仁喜, 崔海容. 2007. 电磁学有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社: 278-293.
- Bill Pike, Rhonda Duey 著. 2002. 李海金译. 2003. 测井技术发展简史[J]. 测井技术信息, 16(2): 1-3.