

电阻率横向剖面探测走滑断层的数值模拟研究

吴子泉¹, 谭捍东², 王成虎²

(1. 山东省地震工程研究院, 山东 济南 250014; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 本文从走滑断层难以探测的实际出发, 讨论了其物性特征。通过对实际模型的数值模拟, 讨论了纵、横剖面电阻率的变化特征。数值模拟结果证明横剖面相比纵剖面在断层探测中有明显的优越性, 为走滑断层探测提出了新的思路。

关键词: 走滑断层; 电阻率; 纵向剖面; 横向剖面; 数值模拟

中图分类号: P631.3⁺22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2005)02-0146-04

Numerical Simulation Study on Detecting the Strike Slip Fault with the Cross Section of Electrical Resistivity

WU Zi-quan¹, TAN Han-dong², WANG Cheng-hu²

(1. Earthquake Engineering Institute of Shandong Province, Jinan 250014, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Facing the fact that strike slip fault is hard to detect, in the paper the physical characteristics of the fault are discussed, through the numerical simulation of actual model, the different variation characteristics of electrical resistivity for vertical and cross sections are discussed also. The result of numerical simulation demonstrates that the cross sections have more marked precedence compared with the vertical section, therefore, this method puts forward a new idea to detect the slip fault.

Key words: Strike slip fault; Electrical resistivity; Vertical section; Cross section; Numerical simulation

0 前言

城市地震活动断层探测是近几年兴起, 为减轻地震灾害开展的一项重要工作。其中活动断层的定位是城市抗震规划、防震减灾的前提。由于大中城市往往位于盆地与平原地区, 城市下的活动断层大多是被第四纪松散沉积物覆盖的隐伏活动断层, 同时城市中存在着城市电缆、金属管线等工业和民用电磁干扰以及机械震动等形成的强震动干扰等, 给地震活动断层探测及精确定位带来了很大的困难。而对地震活动断层进行精确定位是城市地震活动断层研究的关键环节, 它关系到活动断层的性质、活动

方式、速率、古地震事件序列及强震复发间隔等的再研究, 因此研究城市地震活动断层的精确定位方法非常重要^[1]。

用于城市断层探测的方法包括: 高密度电法、高分辨率地震勘探、地质雷达、微重力测量、高精度磁测及放射性气体探测等。野外大量地探测资料表明: 对于上下盘有较大落差的断层, 高分辨率地震勘探、电阻率层析成像等方法都取得了很好的效果。对于两盘落差很小, 两盘岩石电性差异较大的断层, 电阻率层析成像技术效果明显。但是随着城市地震活动断层探测工作的深入, 急需解决两盘基本无落

收稿日期: 2005-01-20

基金项目: 山东省“十五”重点资助项目; 城市活动断层探测(SD1501); 山东省地震局博士基金

* 中国地震局地球物理研究所论著; 01Ac2026

作者简介: 吴子泉(1963-), 男(汉族), 山东寿光人, 高级工程师, 中国地质大学在读博士。

差的走滑断层精确定位问题。为论证该问题,作者根据走滑断层的物性差异,利用电阻率的各向差异^[2-3],提出了利用电阻率横向剖面法对走滑断层进行精确定位。为对比纵、横向剖面的差异性,作者进行了物理模拟实验(已另文研究),取得了很大进展。为能使研究结果更逼近实际情况,作者以潍坊实际断层模型进行数值模拟。研究结果表明:相同异常体横向剖面电阻率异常比纵向剖面电阻率异常幅值显著,形态特制明显,从而认为横向剖面法用于走滑断层探测和定位成为可能。

1 纵、横向剖面的布极及剖面方向

通常在直流电阻率剖面法勘探中,供电、测量电极组成的排列平行于剖面方向布设,整个工作装置沿剖面方向逐点观测,作者将这样的排列和观测方式称之为纵向剖面法。但是由于走滑断层一般产状较陡或近于直立,且断裂带相对两侧的地层一般为良导体,这一特点决定了纵向剖面法无论测线方向如何变化都很难使得无限长断层(相对剖面装置长度)的最大异常得以体现,不利于发现走滑断层和对其定位。要想使得断层的最大异常得以体现,电阻率探测装置必须平行断层走向。为此作者提出横向剖面法的概念,它同纵向剖面法一样,整个工作装置沿剖面方向逐点观测,但工作装置的供电、测量电极组成的排列是垂直剖面方向布设的(图 1)。本文研究结合目前城市活断层探测的实际,选择纵向剖面垂直于断层走向。

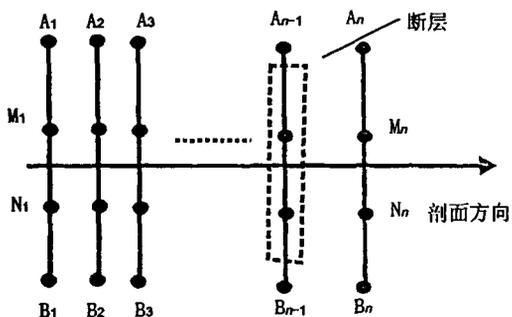


图 1 电阻率横向剖面电极移动示意图
Fig. 1 Sketch of the electrode distribution in the electrical resistivity cross section.

2 三维数值模拟模型的建立和有限元方法基本原理

为研究纵横剖面在断层探测中应用的可能性,使得研究结果对潍坊城市活动断层探测具有指

导意义,本文参考潍坊地区的电阻率测井资料建立了低电阻率三维数值模拟模型。具体参数见图 2 所示。其中第四系厚度为 60 m,电阻率 40 Ωm;断层宽度 30 m,电阻率为 20 Ωm;基岩的电阻率为 100 Ωm。

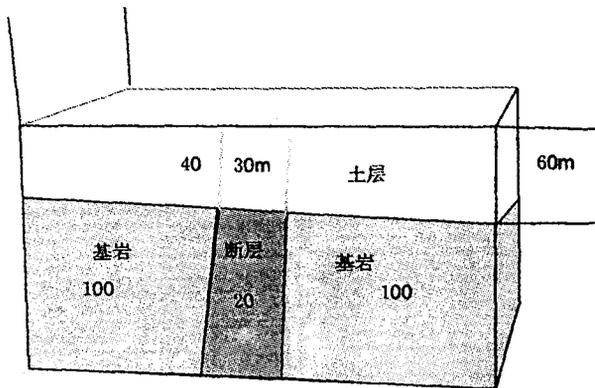


图 2 电阻率数值模拟断层参数模型
Fig. 2 The fault parameter model of electrical resistivity in numerical simulation.

数值模拟使用三维有限元法进行计算。对于点源三维地电情况的电阻率法,电位满足微分方程 $\nabla \cdot (\sigma \nabla U) = -I \delta(X - X_0) \delta(Y - Y_0) \delta(z - z_0)$ 这类问题可一般地写为三维椭圆型偏微分方程边值问题:

$$\begin{cases} L_u = \frac{\partial}{\partial x}(\alpha \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\alpha \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha \frac{\partial u}{\partial z}) = f \\ u|_{\Gamma} = \text{给定值} \\ \frac{\partial u}{\partial n}|_{\Gamma} = 0 \\ (\frac{\partial u}{\partial n} + \gamma u)|_{\Gamma} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

同样可以证明上述微分方程边值问题等价于下面泛函的极小问题:

$$J(u) = \iiint_D \left\{ \frac{a}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] - fu \right\} dx dy dz + \frac{1}{2} \oint_{\Gamma} \alpha \gamma u^2 ds \quad (2)$$

将计算区域分成许多小体积单元,考虑任一个小体积单元,设其中导电率为常数,则在小单元中电位满足拉普拉斯方程 $\nabla^2 \cdot U = 0$ 。

在式(1)中的边界条件约束下求解拉普拉斯方程的问题等价于求下列泛函的极小问题:

$$J(U) = \frac{\sigma}{2} \iiint_V \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz \quad (3)$$

通常用四面体作为单元(如图 3 所示),对区域进行分割。设四面体顶点相应的接点号为 i, j, l, m , 在四面体内部电位线性变化即

$$U = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z \quad (4)$$

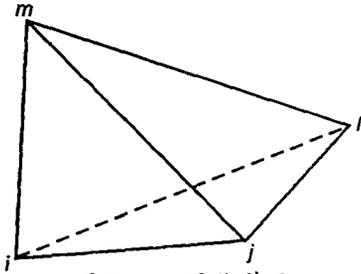


图 3 四面体单元

Fig. 3 The tetrahedron element.

采用与线源二维有限单元法相同的解法求 a_1, a_2, a_3, a_4 , 并代入式(4)中,可写出

$$U = N_i U_i + N_j U_j + N_l U_l + N_m U_m \quad (5)$$

式中 U_i, U_j, U_l 和 U_m 为相应四面体顶点上的电位值, U 和 N 都为 x, y 和 z 坐标的函数, 其中 $N_i = \frac{1}{D}(a_i + b_i x + c_i y + d_i z)$; $N_j = \frac{1}{D}(a_j + b_j x + c_j y + d_j z)$; $N_l = \frac{1}{D}(a_l + b_l x + c_l y + d_l z)$; $N_m = \frac{1}{D}(a_m + b_m x + c_m y + d_m z)$.

式中

$$D = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_l & y_l & z_l \\ 1 & x_m & y_m & z_m \end{vmatrix} = 6V_e$$

这里 V_e 为四面体的体积; $x_i, y_i, z_i, x_j, \dots$ 等为四面体各顶点或相应节点的 x, y 和 z 的坐标, 对任意接点微分, 可得

$$\frac{\partial J}{\partial U_i} = \sigma \iiint_{V_e} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial}{\partial U_i} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial}{\partial U_i} \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial}{\partial U_i} \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right) \right] dx dy dz$$

将各个单元所形成的矩阵叠加求和使得得到总体系数矩阵, 然后解方程组

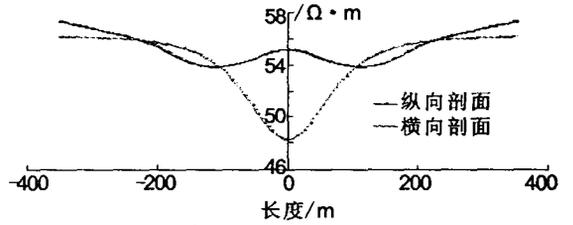
$$KU = 0$$

便可求得各节点的电位值。

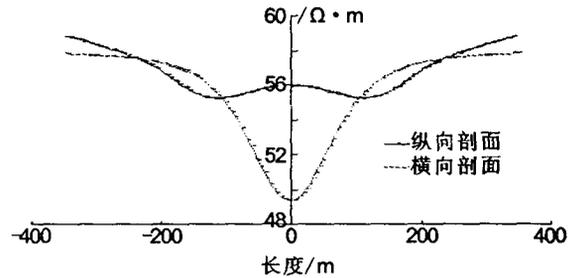
3 数值模拟结果分析

为探讨纵、横向剖面在走滑断层探测中, 不同供电和测量极距及相同供电不同测量极距电阻率的变化特征。作者分别计算了 $AB=500 \text{ m}, MN=100 \text{ m}$; $AB=500 \text{ m}, MN=50 \text{ m}$; $AB=300 \text{ m}, MN=100$

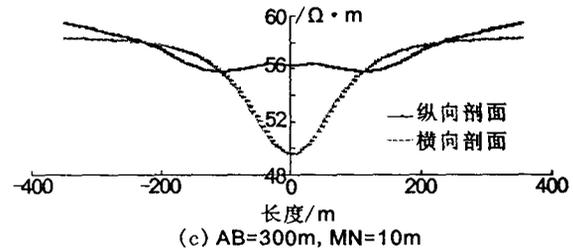
m ; $AB=300 \text{ m}, MN=50 \text{ m}$; $AB=300 \text{ m}, MN=10$ m 等 5 种极距下纵横剖面的电阻率曲线, 结果详见图 4—图 6。



(a) $AB=300\text{m}, MN=100\text{m}$



(b) $AB=300\text{m}, MN=50\text{m}$



(c) $AB=300\text{m}, MN=10\text{m}$

图 4 同极距纵、横向剖面电阻率数值模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of electrical resistivity between the vertical and cross section with same pole span from the numerical simulation.

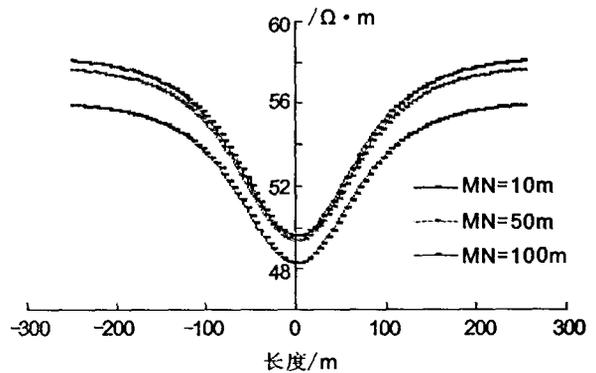


图 5 不同测量极距横向剖面电阻率数值模拟结果对比 ($AB=300 \text{ m}$)

Fig. 5 Comparison of electrical resistivity among the different measure electrode spans in cross section from the numerical simulation.

由图 4 可以看出,在相同的供电极距下横向剖面法有着明显的低阻异常。纵向剖面法的异常则因测量极距的不同而变化。其总体的电阻率的变化特征是:当测点远离异常体时纵、横向剖面的电阻率基本相同;当测点逐渐靠近异常体时 $AB=300\text{ m}$, $MN=100\text{ m}$ 装置的曲线纵向剖面电阻率开始增大,到断层的正上方出现局部高值;然后电阻率开始变小,随着测点远离断层电阻率与横向剖面相近。随着 MN 的变小,即当 $MN=100\text{ m}$ 、 $MN=50\text{ m}$ 、 $MN=10\text{ m}$ 时,纵向剖面在断层上部的异常特征逐渐不明显。

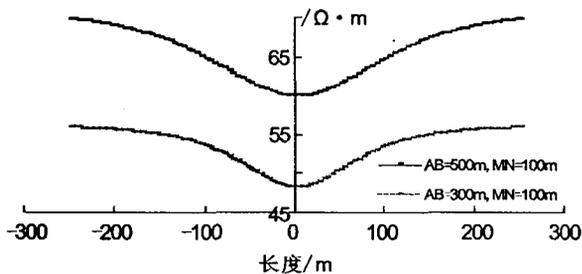


图 6 不同极距横向剖面电阻率数值模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of electrical resistivity between the different electrode spans in cross section from the numerical simulation.

由图 5 可以看出,横向剖面电阻率变化幅值和形态特征基本不随测量极距变化而变化。由图 6 可以看出,横向剖面电阻率变化的形态特征基本不随

供电极距变化而变化,但幅值有一定差异,随着供电极距的探测深变大,电阻率幅值增大。体现出了横向剖面法最大的特点,即在满足测深要求的情况下,较小的供电极距,即可满足断层探测的要求。

由此可以看出,在正常的野外施工中,横向剖面将比纵向剖面有非常大的优越性,因为同样的极距,横向剖面电阻率异常显著,纵向剖面要想得到与横向剖面相同幅度的异常,就要增大供电极距,这无疑要给现场工作带来很大的困难。同时也使得资料解释复杂化。

4 结论

通过上述数值模拟,可以得出如下结论:

- (1) 对于呈现低电阻率特点的走滑断层,横向剖面电阻率异常较纵向剖面显著;
- (2) 使用横向剖面只要选取足够测深的极距,即可获得很好的探测效果。

[参考文献]

- [1] 邓起东,徐锡伟,张先康,等.城市活动断裂的探测方法和技术[J].地学前缘,2003,10(1):93-104.
- [2] 陈峰,廖春庭,安金珍.剪切和摩擦滑动大模型的视电阻率变化幅度和各向异性[J].地球物理学报,2003,46(5):667-675.
- [3] 郝锦琦,冯锐,周建国,等.岩石破裂过程中电阻率变化机理的探讨[J].地球物理学报,2002,45(2):426-433.