

# 浅层直流电法探测隐伏断层可行性分析

王爱国<sup>1,2</sup>, 马巍<sup>1</sup>, 王大雁<sup>1</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**通过讨论断层不同表现形式的电性特征, 对高密度电法与联合剖面法在隐伏断层探测中的应用可行性进行研究, 并通过实例探讨了测试中应注意的问题、测试与解译方法。研究表明高密度电法及联合剖面法可以应用在隐伏断层探测中, 但有一定的限制, 主要源于断层的地质表现形式。

**关键词:**浅层直流电法; 隐伏断层; 高密度; 联合剖面

**中图分类号:** P315.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1005 - 586X(2005)03 - 0001 - 07

## 0 引言

隐伏断层探测是一项难度很大的工作, 特别是城市活断层工作开展以来, 关于隐伏断层探测的各种手段和方法的探讨与应用更是热烈展开<sup>[1~2]</sup>。浅层电法作为一种无损、易行、低价、直观的探测手段, 更是在其中发挥着重要作用。电法探测隐伏断层方法由来已久, 最早是用联合剖面法<sup>[3]</sup>, 认为断层为相对低阻体, 在联合剖面曲线上表现为正交点, 但正交点的产生原因多样, 除非有足够的先验证据, 否则很难根据联合剖面正交点就判定为断层。而后随高密度电阻率法应用于隐伏断层探测<sup>[4~6]</sup>, 有了地下结构电阻率分布的直观表示, 但断层往往很难如预想的那样有明显的显示, 特别是在反演过程中, 得到的电阻率剖面往往有较大的差异, 对于断层更是模棱两可, 因此其解译往往需要经验。本文将从断层的电性特征着手, 结合工作实际, 分析电阻率法探测隐伏断层的可行性, 并通过实例探讨在测试中应注意的问题及测试方法。

## 1 浅层直流电法工作原理与方法

浅层直流电法中常用的有联合剖面法与高密度电法, 这 2 种方法都是通过分析测得的地层电阻率变化来判断地下结构变化。地层电阻率的测定, 是通过 2 个供电电极 AB 中间接上直流电源, 向地下供电形成人工电场, 同时测量地表所产生的电位差, 然后计算出电阻率。

收稿日期: 2005 - 08 - 15

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目资助, No. KZCX1 - SW - 04; 国家自然科学基金重大项目 (90102006)。

作者简介: 王爱国 (1972 - ), 男, 湖北洪湖人, 副研究员, 主要从事地震地质、工程地震、寒区工程方向的研究。

Email: waguo @ns. lzb. ac. cn

### 1.1 直流电阻率法的基本原理<sup>[7]</sup>

在一定的范围内,大地的表层可以看作是“半无限均匀介质”,地表供电电极将在地表一定深度范围内按特定规律分布电场、电流和电压。直流电阻率法就是通过一定供电电极向地下供电,测量地表电流与电压来计算地下电阻率值。在电法探测中,经常使用四极装置测量地层电阻率。设 A、M、N、B 4 个电极按序排列在一条直线上,A、B 是一对供电电极,M、N 是一对测量电极,且两电极对都对称于中心 O 点(测点)。设测量电极 MN 间的电位差为  $U_{MN}$ ,地中电流为  $I$ ,则介质的电阻率为:

$$= \frac{U_{MN}}{I} \cdot \frac{2}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} = K \cdot \frac{U_{MN}}{I}$$

式中,  $K = \frac{2}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$  为装置系数。电极排列方式不同,装置系数公式不同。

由此可见,如果用仪器测出通过 A、B 电极供入地下的电流强度  $I$ ,测出电场中地面上任意 2 点 M、N 之间的电位差  $U$ ,并根据 A、B、M、N 之间的相互距离算出  $K$  值,就可以算出地下岩层的视电阻率。

### 1.2 联合剖面法工作方法

联合剖面是由 AMN NMB 2 组三级装置组成。A、M、N、B 相对位置固定,沿某一测线测量电阻率值。公共的无穷远极用 C 表示,测量过程中 C 极不动(图 1),只是 A、M、N、B 4 个电极沿测线同时向一个方向移动。在每一个测点 O 上,AC 极供电,MN 极测量电位差,得到一个视电阻率,以  $\rho_s^A$  表示。这样,每一个测点就得到 2 个  $\rho_s$  值,即  $\rho_s^A$  与  $\rho_s^B$ 。测量中,沿测线前进方向的供电电极为 B 极,另一个为 A 极。

在方格纸上,以横坐标代表测点距离,以纵坐标代表  $\rho_s$  值。将  $\rho_s^A$  与  $\rho_s^B$  点在同一图上,把各点的  $\rho_s^A$  与  $\rho_s^B$  分别连接起来,即为  $\rho_s^A$  曲线与  $\rho_s^B$  曲线。 $\rho_s^A$  曲线与  $\rho_s^B$  曲线的交叉点有正交点和反交点,地下不同的电阻率异常体在联合剖面曲线上表现为不同曲线形态和正交点与反交点的组合。根据不同极距方式下的联合剖面曲线可以判定地下异常体的性态和特征。

### 1.3 高密度电法基本工作原理

高密度电阻率探测方法是近几年来开发研制出的一种新型的直流电法探测系统。就其基本原理而言,与传统的电阻率法完全相同。图 2 为高密度电阻率系统的结构示意图,它包括数据的收录和资料的处理 2 个部分。现场测量时,只需将全部电极设置在一定间隔的测点上,然后用多芯电缆将其连接到程控式电极转换开关。通过高密度电法测量系统中的软件,根据控制系统中选择的探测装置类型,对电极进行相应的排列组合,按照测点位置的排列顺序或探测剖面的深度顺序,逐点或逐层探测,实现供电和测量电极的自动布点、自动跑极、自动供电、自动观测、自动记录、自动计算、自动存储。测量完毕,通过数据传输软件把探测系统中存储的探测数据调入计算机中,便可根据需要按给定程序对原始资料进行处理并给出相应的图示结果。

## 2 隐伏断层的地质表现形式与电性特征

断层的总体特征是二维板状体,向下延伸很深。相对于围岩介质的电阻率,断层可表

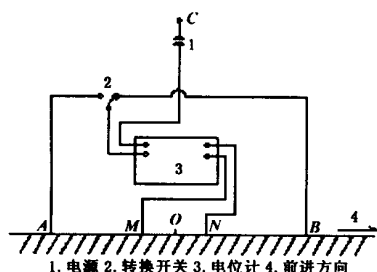


图 1 联合剖面装置示意图

Fig.1 Sketch map of composite profile installation

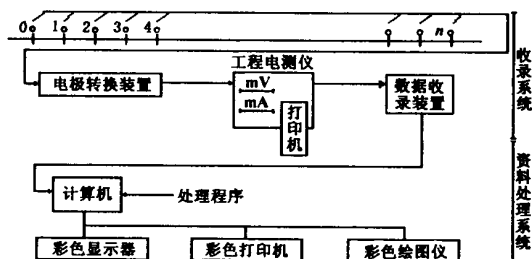


图 2 高密度电阻率测试系统结构图

Fig.2 Structure of high density resistivity test system

现为高阻断层<sup>[8]</sup>或低阻断层<sup>[9]</sup>,决定于断层的性质、破碎带宽度、胶结程度、含水特征、岩脉侵入等特性及围岩电阻率特性。一般来说,新活动断层,电阻率值较低,断层越老,胶结程度越强,电阻率值越高;断层破碎带越宽,越破碎,电阻率相对较小;地下和地表水越丰富,电阻率越小;张性断层少水,则为高阻,张性断层富水,则为低阻;有岩脉顺断层侵入,多为高阻。

根据断层的发育情况及其与两侧岩层的电性差异,断层的电性特征主要有如图 3 所示几种表现。当断层破碎带宽、断层电阻率与两侧岩层电阻率差异明显时,断层表现为高阻或低阻板状体;当断层不发育或断层电阻率与两侧岩层电阻率差异不明显时,如果断层两侧岩性不同,断层将表现为岩性分界面;如果断层两侧岩性相同且与断层的电阻率差异不大时,电法探测将很难奏效。

### 3 隐伏断层探测实例

#### [实例 1] 渭河盆地隐伏断层视电阻率特征

渭河盆地隐伏断层破碎带较宽,全新世以来多有活动<sup>[10]</sup>,表现为张性正断,且含水丰富,地下水矿化程度高,因此,隐伏断层电阻率值很低,在电性上表现为岩层间有一定厚度的低阻板状体。理论上讲,该类断层在浅层电法各种装置探测中均能有明显的异常表现。

张秀香等<sup>[9]</sup>曾在咸阳魏家泉南和咸阳陶瓷厂建材分厂西用中间梯度法和对称四极剖面法跨该断层进行不同极距下的电测剖面探测,图 4 为电测剖面视电阻率曲线。从图可以看出,渭河盆地隐伏断层在不同极距下都呈现出明显的视电阻率负异常,异常的幅度较大,在破碎带上的视电阻率值仅为断层两侧的  $1/2 \sim 1/8$ 。随着勘探深度的增加,视电阻率异常的幅度逐渐变大,而且破碎带的宽度轮廓也显示得更加清楚。这是因为随着深度增加,断层的垂直断距越大,反映出不同介质的电性差异也就越大。从  $AB/2 = 500\text{m}$  的电测剖面上可以看出渭河断裂破碎带宽约 80m,其视电阻率值在破碎带上只有约 10 m,两侧视电阻率值为 60 ~ 100 m。在破碎带两侧的视电阻率值不是对称的,它反映出断层两侧的垂直差异运动。

#### [实例 2] 景泰小红山断层隐伏段探测

景泰小红山断层位于景泰县北小红山南侧,断层切割了第三系上新统浅红色砂岩夹

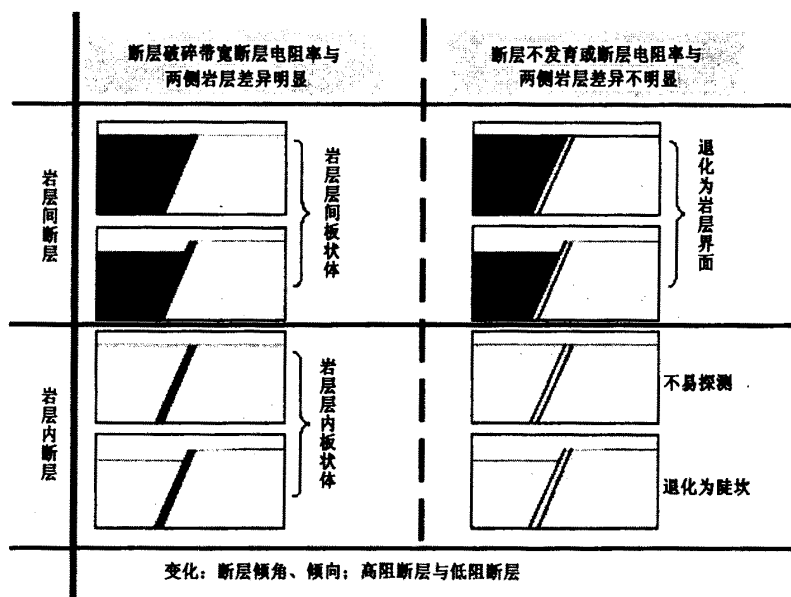


图 3 断层的典型电性结构表现

Fig. 3 Typical electric structures of faults

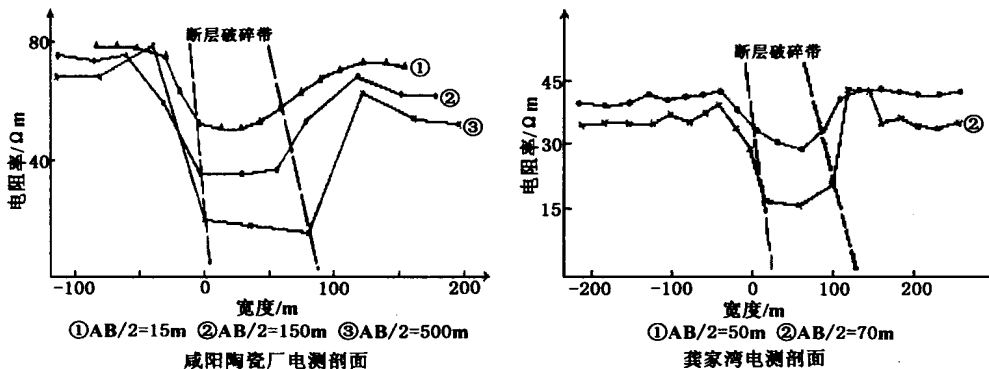


图 4 渭河隐伏断层视电阻率曲线

Fig. 4 Apparent resistivity curves of buried faults in Weihe area

泥岩 ( $N_2$ ) 及下更新统砂砾岩 ( $Q_1$ )。该断层向东过小红山后被平坦宽阔的冲洪积平原所覆盖,为探测该断层向东延伸的方向及位置,在冲洪积平原中布置高密度测线进行探测。由于区域上确定该断层最新活动时间为晚更新世至全新世早期,断层活动性不强,断层出露段破碎带不发育,推测该断层本身的电性异常不会太明显。

图 5 为某测线的高密度电阻率反演断面,探测结果显示,断层本身的电阻率异常确实不明显,但断层两侧的电阻率差异悬殊,断层在该断面表现为岩层电性差异界面。断层北侧为上新统浅红色砂岩夹泥岩 ( $N_2$ ),电阻率相对较小,为几十至上百欧姆米;断层南侧为下更新统砂砾岩 ( $Q_1$ ),电阻率值为 600 m 米左右。断层两侧形成明显的电阻率差异。断

层上覆厚约 5m 的冲洪积平原砂砾土层基本连续,由于该处地表水含碱量大,地表砂砾土层表现为极低阻,含水区电阻率值只有十几欧姆米,局部干旱砾石层电阻率较高。电阻率断面未显示地表冲洪积层被断层错动的证据。断层面上部向南缓倾,下部陡倾,与出露断面特征相似。其它几条电阻率剖面所揭示特征基本于该剖面一致,对于该断层的向东延伸具体位置进行了准确判定。

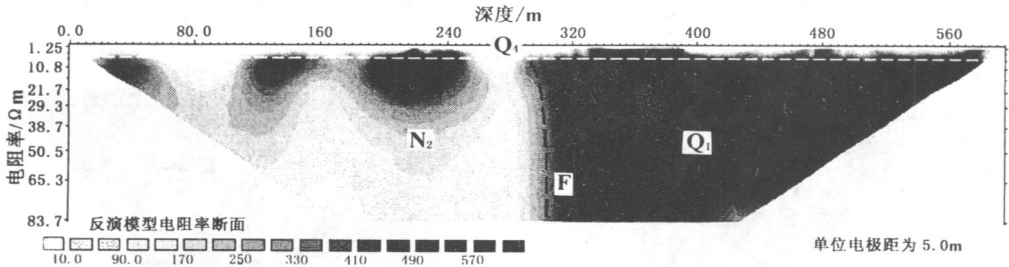


图 5 小红山断层隐伏段高密度电阻率反演剖面

Fig. 5 Inverse profile of high density resistivity in buried segment of Xiaohongshan fault

### [实例 3] 中卫 - 同心活动断裂带沙漠覆盖段探测

中卫 - 同心活动断裂带是青藏高原东北缘北祁连山断裂系东段北支的重要组成部分,该断裂带西起营盘水,向东经甘塘、孟家湾、双井子、小洪沟、同心西王团至固原七里营,EW 向转 NNW 向弧形延伸长 200 余千米,是一条全新世活动的区域性大断裂。断层西段一碗泉至西梁头长 20km 区段由于沙漠覆盖,对该区断层的形态及具体位置一直存有争论。采用高密度及联合剖面法对该断层进行探测。

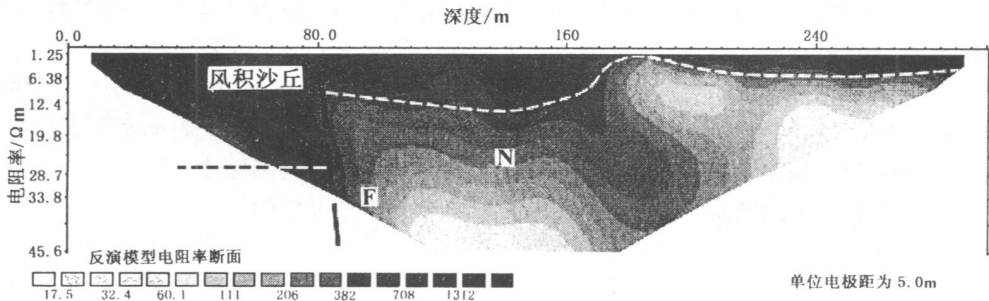


图 6 中卫 - 同心活动断裂带一碗泉西断层隐伏段高密度电阻率反演剖面

Fig. 6 Inverse profile of high density resistivity in buried segment of Yiwanquan west fault in Zhongwei - Tongxin active fault zone

覆盖区沙丘及砂砾石层厚度不一,在小孤山断层断错风积沙丘,因此推断测试区断层浅层可能位于第四系覆盖层内。由于断层新活动性强,从电性特征看,对于覆盖层较厚区,断层可能显示为同层中的低阻板状体,对于覆盖层较薄区,断层则可能显示为陡坎或有陡坎的低阻板状体。

图 6 为一碗泉东测线电阻率反演断面,断层隐伏深度 7m 左右,断层断错了第三系 N 砖红色砂岩夹泥岩与第四系风成砂,第四系可见断距约 25m。断层上覆厚 7m 的风成沙丘电性上没有被错断的显示。

图 7 为西营盘子测线电阻率反演断面。该处覆盖层较厚,由于断裂带在该处附近形成斜接关系,高密度剖面上断层显示为一深一浅 2 条断层所夹的宽约 200m 破碎带。破碎带推测由于为地下水通道,电阻率相对较低,约为风成沙丘电阻率的  $1/10 \sim 1/20$ 。

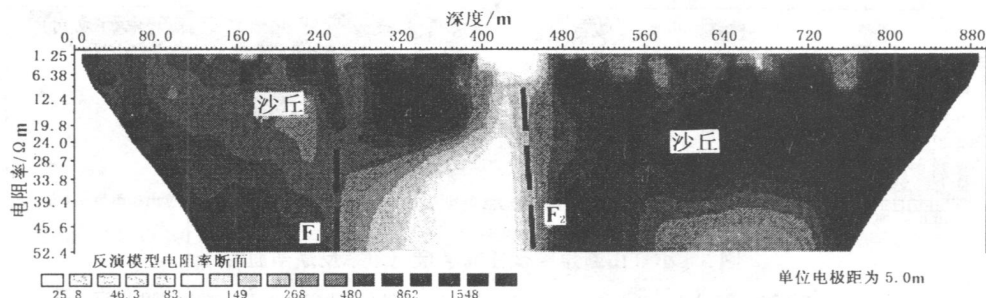


图 7 中卫 - 同心活动断裂带西营盘子断层隐伏段高密度电阻率反演剖面

Fig. 7 Inverse profile of high density resistivity in buried segment of Xiyingshanzi fault in  
Zhongwei - Tongxi active fault zone

#### 4 结论与探讨

从以上实例可以看出,浅层电法对有电性判别特征各类断层的探测是有效的,作为一种价廉、无损、快速的探测手段,在隐伏断层探测中能很好地发挥其作用。但电法是以地电阻率为基础的,只有那些在电性结构上能表现出差异的断层才有可能被探测出来。因此,在隐伏断层探测工作中,首先必须根据探测区地质情况,对可能存在的隐伏断层地质表现形式有充分的认识,这样才能选择好合适的探测手段、布极方式和电极参数,并对断层可能出现的异常表现有一定的了解,在解译工作中才不致错判或遗漏隐伏断层。另外,在测试中为提高测试结果解译的可信度,常采用联合剖面与高密度 2 种方法的联合测试,当 2 种方法显示的断层异常形态一致时,其结果一般是可信的。

**参考文献:**

- [1] 邓起东,徐锡伟,张先康,等.城市活动断裂探测的方法和技术[J].地学前缘,2003,10(1):93~104.
- [2] 金东淳,崔天日.物探方法在探测隐伏断层中的应用[J].世界地质,2003,22(1):82~85.
- [3] 张向红,杨斌,周俊喜,等.兰州中川民用机场扩建工程场地隐伏活断层探测研究[J].西北地震学报,2000,22(4):458~464.
- [4] 姜早峰.高密度电法CT成像技术在活断层探测中的应用[J].东北地震研究,2004,20(2):40~43.
- [5] 董浩斌,王传雷,曾佐勋,等.高密度电法在信阳市燃气混气站场地隐伏断裂探测中的应用[J].地质科技情报,2003,22(1):101~104.
- [6] 李志祥,毛先进,韩明,等.高密度电阻率法在隐伏断层探测中的应用[J].地震研究,2003,26(3):275~278.
- [7] 傅良魁.电法勘探教程[M].北京:地质出版社,1983.14~23.
- [8] 刘钊刻.电法勘探在金矿普查中的应用[J].黄金,1995,16(12):2~6.
- [9] 张秀香,王秀生.渭河盆地隐伏断层的视电阻率特征[J].西北地震学报,1997,19(2):77~80.
- [10] 侯建军,韩慕康.渭河盆地全新世隐伏构造活动[J].地理学报,1994,49(3):258~265.

## STUDY ON THE DETECTABILITY OF BURIED FAULT BY SUPERFICIAL DIRECT - CURRENT ELECTRICAL PROSPECTING

WANG Ai - guo<sup>1,2</sup>, MA Wei<sup>1</sup>, WANG Da - yan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental  
and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. Earthquake  
Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The paper discusses the electrical characteristics of buried fault in different environment and feature, and studies the detectability of every kind fault by superficial direct - current electrical prospecting. Some prospecting cases show that high - density resistivity tomography and resistivity composite profile can clearly mark the existence of buried fault with distinct electrical difference to environment.

**Key words:** Superficial direct - current electrical prospecting; Buried fault; High - density resistivity tomography; Resistivity composite profile