

# 隐伏断层电性特征及浅层电法探测

王爱国<sup>1,2</sup>, 马 巍<sup>2</sup>, 张向红<sup>1</sup>, 柳 煜<sup>1</sup>

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 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)

**摘要:**探讨了不同类型隐伏断层的电性特征及其在浅层电法测试中可能的表现形式, 并通过实例阐述了浅层电法探测隐伏断层的步骤及异常识别方法。研究表明浅层电法对某些类型的隐伏断层的探测是有效的, 但先验知识非常重要, 对于隐伏断层的探测效果与解译起关键作用。

**关键词:** 浅层直流电法探测; 隐伏断层; 高密度; 联合剖面

中图分类号: P631.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2006)03-0242-06

## Electrical Characteristics of Buried Fault and Prospecting by Superficial Direct-current Electrical Method

WANG Ai-guo<sup>1,2</sup>, MA Wei<sup>2</sup>, ZHANG Xiang-hong<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The electrical characteristics of buried fault in different environment, and the curve shape of resistivity composite profile for different kinds of fault. The process of buried fault prospecting by superficial direct-current electrical method is illustrated by real some cases. The results show that superficial direct-current electrical method is valid to the detecting of some kind of buried fault but the prior knowledge is very important and is the key to the efficiency of prospecting and the interpretation of result.

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

## 0 引言

隐伏断层探测是一项难度很大的工作, 自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日益增多<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, 在隐伏断层探测中发挥着重要作用。浅层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。但正交点产生的原因多样, 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很强的经验。本文将从不同表现形式的隐伏断层的电性特征及异常表现着手, 结合工作实际, 阐述电阻率法探测隐伏断层工作的步骤、异常解译及在测试中应注意的问题。

## 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, 这两种方法都是通过分析测得的地层电阻率

收稿日期: 2005-08-03

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-04); 国家自然科学基金重大项目(90102006); 中国地震局兰州地震研究所论著号: LC20060009

作者简介: 王爱国(1972—), 男(汉族), 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。

变化来判断地下结构变化。地层电阻率是通过一定供电电极向地下供电,测量地表电流与电压后按一定公式计算得到<sup>[7]</sup>。常用的测量方法有四极装置和三极装置。

### (1) 联合剖面法与对称四极法工作方法

联合剖面是由 AMN $\infty$ NMB 两组三极装置组成。AMNB 位于同一直线上,相对位置固定,沿某一测线测量电阻率  $R$  值。C 为公共的无穷远极,测量过程中不动,只是 AMNB 四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  $R_a$  表示。这样每一个测点就得到两个  $R$  值,即  $R_a$  与  $R_b$ 。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坐标,以纵坐标代表  $R$  值,将  $R_a$  与  $R_b$  点在同一图上;将各点的  $R_a$  与  $R_b$  分别连接起来,即为  $R_a$  曲线与  $R_b$  曲线。 $R_a$  曲线与  $R_b$  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。

在联合剖面装置中,若以 A 极和 B 极供电,测量 MN 极电位差及地下电流,则成为对称四极装置。对称四极装置测得的地电阻率  $R_{ab}$  反映了一定深度范围内地下电阻率沿测线方向的高低变化。数值上  $R_{ab}$  为同一测点联合剖面法  $R_a$  与  $R_b$  的平均值,即  $R_{ab} = (R_a + R_b) / 2$ 。

### (2) 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。其基本原理与传统的电阻率法完全相同,包括数据的收录和资料的处理两部分。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,断层可表现为低阻断层<sup>[8]</sup>或高阻断层<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;压性断层少水,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 1 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;当断层带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,电法探测将很难反映。

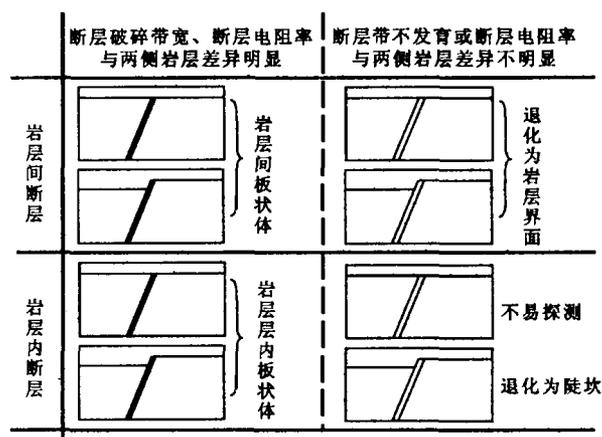


图 1 隐伏断层的典型电性结构表现

Fig. 1 Typical electrical styles of buried fault.

## 3 不同异常体的电法异常特征

对于高密度探测来说,由于其显示的是剖面的电阻率分布等值线,理论上讲对于各类异常应该是一目了然,不同类型断层在高密度剖面上的显示应该同上述典型电性结构一致。但实际探测中由于各种干扰、反演本身的不确定性及反演假象的存在,如在一个高(低)值异常的四周边对称地分布着四个低(高)值异常,高密度剖面并不会像典型电性结构一样清晰。再加上高密度剖面是以等值线形式来绘出的,等值线需要插值,往往就减弱了异常突变的清晰

性。因此高密度剖面往往似是而非,需要联合剖面等其它手段辅助验证。

这里对不同异常体在联合剖面与对称四极剖面上的异常表现<sup>[7]</sup>进行论述。实际探测中可结合高密度剖面,根据这些特征进行异常的识别与排除,从而确定隐伏断层。

#### (1) 岩性界面异常<sup>[7]</sup>

图2为联合剖面法与对称四极剖面法过垂直接触面时的视电阻率 $R_s$ 曲线。在岩性界面附近, $R_s$ 与 $R_o$ 将形成明显电阻率分异,但不形成交点,两侧岩层的电阻率差异越大,曲线变化阶跃越陡;远离界面,两者都将趋近于岩性电阻率。对称四极剖面电阻率曲线则在界面附近形成电阻率的突变。

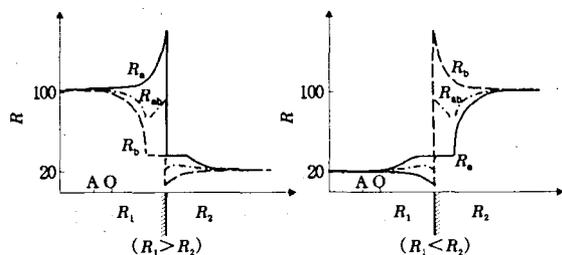


图2 岩层垂直接触面的联剖与对称四极剖面曲线  
Fig. 2 Curves of resistivity composite profile and symmetry pole-pole profile passing upright lithologic interface.

#### (2) 球体异常<sup>[7]</sup>

图3(a)与图3(b)分别为低阻球体与高阻球体在不同电极距情况下的联剖与对称四极曲线表现。可以看出,在低(高)阻球体上方出现正(反)交点,电极距越大,曲线开口越小,球体的电阻率异常越突出,而且形成多次交点。球体的另一特点是曲线以球体为中心对称分布,对称四极曲线在球体附近形成一次极值。

#### (3) 板状体异常<sup>[7]</sup>

与球体类似,低阻板状体(图3(c))与高阻板状体(图3(d))的异常表现也在上方出现正(反)交点。板状体直立时,正交点出现在板状体顶端;板状体倾斜后,联剖曲线的交点便离开板顶向倾斜方向发生位移,倾角越小位移越大;交点一侧为板状体倾斜方向。小极距情况下直立板状体与球体的联剖曲线很相似,但对称四极曲线的凹凸方向刚好相反。随极距增大板状体联剖曲线分离带加长,曲线开口更明显,且在异常体附近形成多个极值点。但交点始终只有一次,这是与球体异常的明显区别。相对于低阻板,高阻板在联合剖面与对称四极剖面中的异常不如低阻板显著和敏感。

另外,纯地形的变化也会在联剖曲线中形成交点,不同的地形曲线形态很不一致,联剖曲线解译时也要考虑这一影响因素。

从前面隐伏断层的电性特征分析,隐伏断层的异常表现可能为电性界面、板状体或陡坎,其联合剖面与对称四极剖面曲线各具自身特点,在不同极距方式下可以明确的判定。实际探测资料解译隐伏断层时应根据地质条件与高密度剖面综合判定。

## 4 电法探测隐伏断层方法及实例

电法探测隐伏断层主要考虑隐伏断层的电性特征,因此探测主要分以下步骤进行:

(1) 首先要收集探测区的地质与构造资料,以对本区断层可能的表现形式及电性结构有一个大致的了解;

(2) 对测区的岩性电阻率进行标定,以便对探测剖面进行地质结构解译;

(3) 选择合适的探测方法及电极距、装置参数,以使探测能最大程度的体现可能出现的隐伏断层的异常;

(4) 合理布置测线并进行探测;

(5) 探测资料处理与解译。

探测工作中,我们发现有明显地电阻率差异的断层,如破碎带宽、活动新、含水量大的断层及断层两侧有明显电阻率差异的断层,其在高密度、联剖及其他装置方式中均有清晰显示;而有些有干扰的测试断面,在一种探测方式中由于干扰异常使断层显示不清,但在另一探测方式中干扰能被压制使断层能有明显表现;有些情况则是干扰造成的断层假象,这些都需要用多种方式综合判定。以下是隐伏断层探测中的几个实例。

### 4.1 景泰小红山断层隐伏段探测实例

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4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,但断层两侧的电性差异悬殊,断层表现为岩层电性差

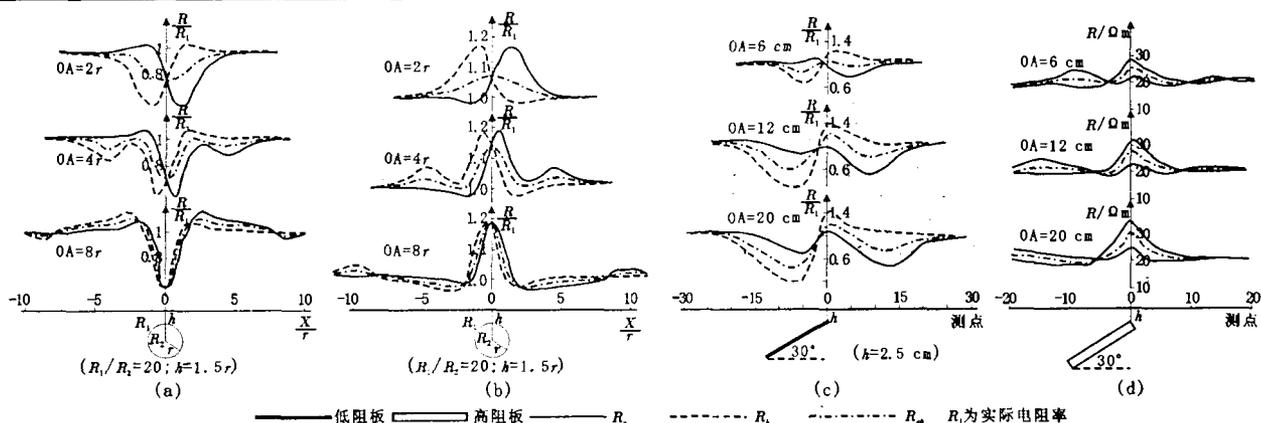


图3 球体与板状体在不同电极距情况下的联剖与对称四极剖面曲线对比

Fig. 3 Curves of resistivity composite profile and symmetry pole-pole profile passing sphere and plank body.

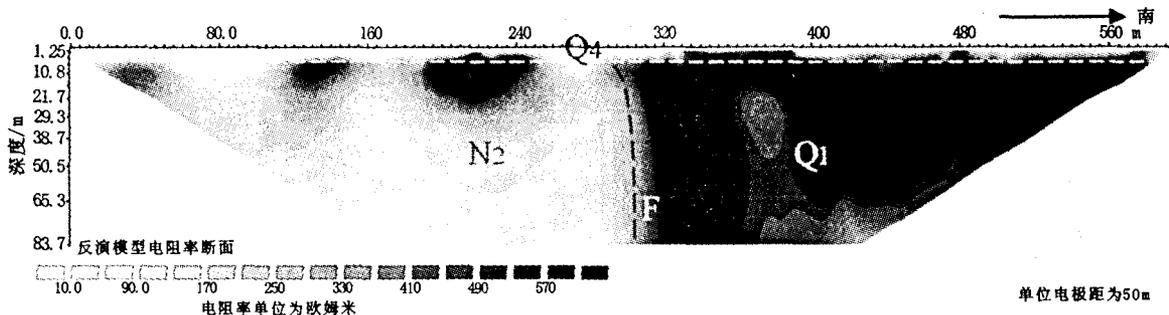


图4 小红山断层隐伏段高密度电阻率反演剖面

Fig. 4 Inversion high density resistivity profile of buried segment of XiaoHongshan fault.

异界面:断层北侧为上新统浅红色砂岩夹泥岩(N<sub>2</sub>),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<sub>1</sub>),电阻率值为600 Ωm左右。断层上覆厚约5 m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与该剖面一致,对于该断层的向东延伸具体位置进行了准确判定。

#### 4.2 兰州刘家堡断层探测实例

刘家堡断裂西起兰州市安宁区沙井驿,跨黄河经七里河区北至雷坛河断裂止,断裂上部为黄河I~III级阶地所覆盖,同时由于城区人类活动程度高,断层整体处于隐伏状态。根据钻孔和水文电测深资料,断层断于第三系(E-N)和下更新统(Q<sub>1</sub>)之间,断裂埋藏浅,两侧岩性和岩相差异较大,西段控制了马滩断陷的北界。

图5为该断层刘家堡测线反演电阻率剖面及不同电极距下的联合剖面曲线。从图中可以看出,大致

以测线1100 m为界,两侧岩性电阻率分布显示不同的特征:北段明显表现出水平分层的特征,自上往下呈现为高阻层—低阻层—高阻体的分布,各层水平方向连续,顶部高阻层厚约8 m,中间低阻层厚约15~20 m,底部高阻体则表现为相对高低阻体的水平方向串珠状分布;测线南段地电阻率分布较不规则,但总体表现为底部高阻体,无明显的水平分层现象,在测线1120 m附近高阻体断逝,并形成很窄的垂向低阻带,推测该处为断层通过处。不同电极距情况下的联合剖面及对称四极剖面曲线北段电阻率变化较平稳,联合剖面R<sub>a</sub>与R<sub>b</sub>差异不大,始终比较接近。对称四极曲线则规则的高低交替缓变与高密度揭示的深部高阻体中相对高低阻体水平方向的串珠状分布相对应。测线南段清晰揭示了两个高阻体a和b,并且均在测线1120 m附近出现正交点,揭示了垂向断层破碎带的存在。电极距越大,联剖分离带越长,开口也越明显,为典型的低阻板状体特征。根据不同极距下交点的位置,该断层为一陡倾断层,与高密度剖面揭示的情况基本相符。断层显示为低阻板状体,也说明了断层的新活动性。

#### 4.3 某火电厂扩建工程场地隐伏断层探测实例

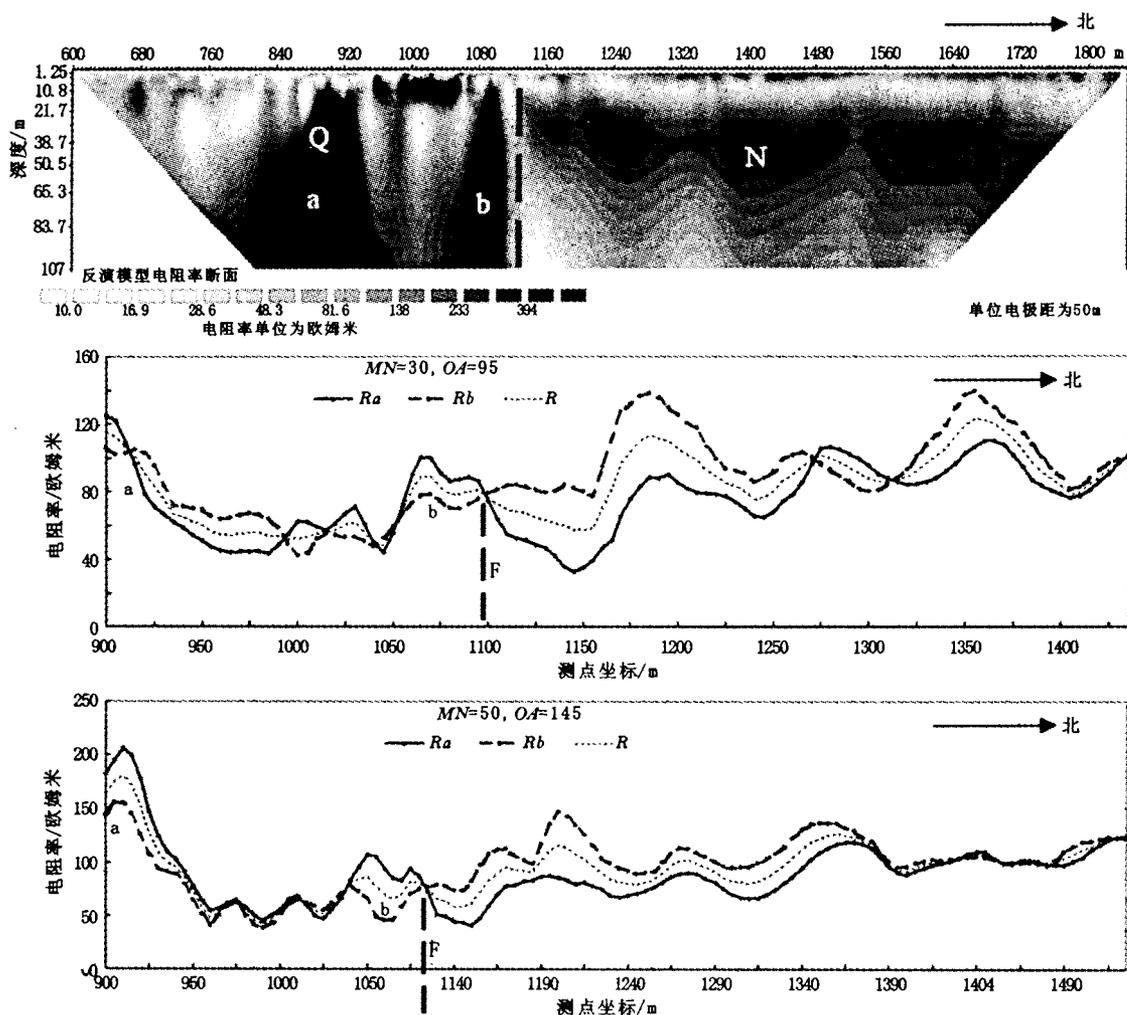


图 5 刘家堡断层刘家堡测线反演电阻率剖面及不同极距下的联合剖面曲线

Fig. 5 Inversion high density resistivity profile and resistivity composite profile of Liujiabu fault at Liujiabu

某火电厂扩建厂址位于泾河南岸  $T_{1-2}$  级阶地, 地形平坦开阔, 原为耕地。厂址区地层上部为第四系全新统冲洪积层, 下部为第三系棕红色砂质泥岩, 地表上覆 3~7 m 厚度不等的含砾粉土。图 6 为某测线反演得到的电阻率剖面及不同极距下的联合剖面曲线。从图可以看出, 沿该测线地电阻率分布不均匀, 深部靠近电厂一侧电阻率相对较低, 存在低阻含水层 a 及局部球形高阻体 b, 但总体看从地表往下呈现高阻—低阻—高阻变化的水平分层特征。在测线坐标 260 m 处, 深部似乎存在岩性电阻率分界, 有断层存在的可能。两种极距方式下的联剖曲线验证表明, 联合剖面中的异常主要反映了高阻球体 b 的特性: 小极距情况下, 在高阻体 b 上方出现明显的分叉, 而低阻区 a 由于探测深度不够, 特征不明显; 大极距情况下则突现了球形高阻体 b 的异常特征, 同时在低阻区 a 整体电阻率降低, 一方面为 a 的反映,

另一方面也为 b 的连带反映。因此推断高密度剖面深部的电阻率突变为高阻体 b 的叠加效应。由于靠近一期工程冷却塔, 深部含水量不均匀, 造成深部总体电阻率呈现出远离冷却塔电阻率增高的渐变过程, 场地沿该测线没有隐伏断层通过。其它测线及钻孔证实了这一解译的合理性。

### 5 结论与探讨

由于隐伏断层与周围介质存在差异, 浅层电法作为一种价廉、无损、快速的探测手段, 对某些类型的隐伏断层探测是经济有效的。但电法是以地电阻率为基础的, 探测中必须根据探测区内地质情况, 对可能存在的隐伏断层的电性结构表现形式有充分认识, 并选择好合适的探测手段、布极方式和电极参数, 同时结合多种手段探测结果综合解译, 才能对隐伏断层的有无及性质做出准确的判定。

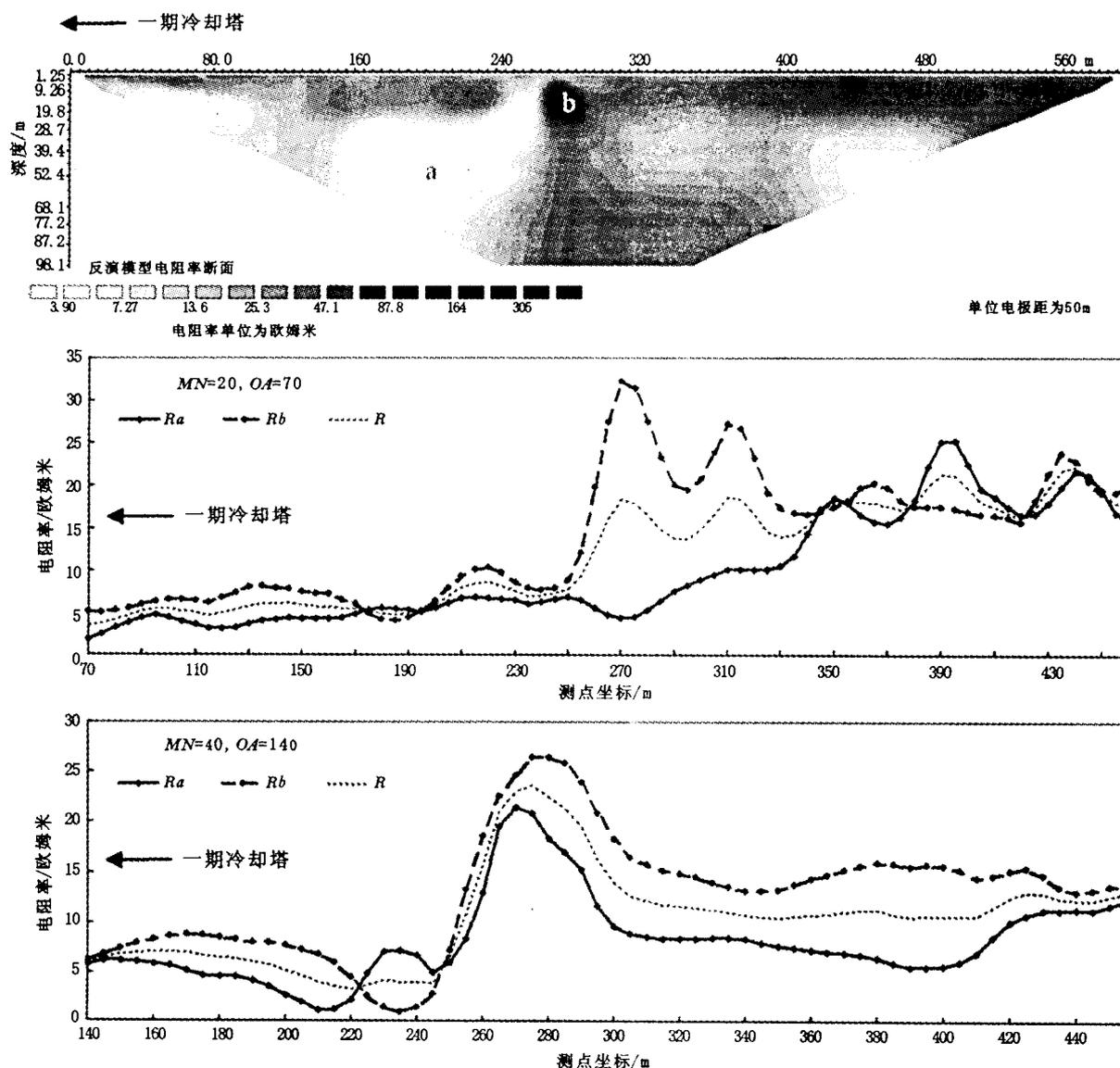


图 6 某电厂工程场地电法探测测线反演电阻率剖面及不同极距下的联合剖面曲线

Fig. 6 Inversion high density resistivity profile and resistivity composite profile of one surveying line at a project site.

【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] 傅良魁主编. 电法勘探教程[M]. 北京:地质出版社,1983. 14-23.

[8] 刘钊剑. 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.