

引用格式:刘心路,李自安,梁应杰.高密度电阻率法在近地表隐伏断层检测中的应用[J].科学技术与工程,2019,19(18):93-99

Liu Xinlu, Li Zian, Liang Yingjie. Application of multi-electrode resistivity method to detect the near-surface buried fault[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(18): 93-99

# 高密度电阻率法在近地表隐伏断层检测中的应用

刘心路<sup>1,2</sup> 李自安<sup>3\*</sup> 梁应杰<sup>1,2</sup>

(中国科学院广州地球化学研究所矿物与成矿重点实验室<sup>1</sup>,广州 510640;中国科学院大学<sup>2</sup>,北京 100049;中山大学海洋学院<sup>3</sup>,广州 510006)

**摘要** 隐伏断层对于道路、地基等具有重大威胁,高密度电阻率法是以地层之间电阻率差异为基础的探测地下构造和电性异常体的一种间接性的地球物理方法,近年来,在近地表探测隐伏断层方面应用广泛。基于此,首先对断层模型进行正演模拟,研究了断层模型的响应规律,然后以山西某段公路隐伏断层检测为例,简要介绍了高密度电阻率法的基本原理以及常用的两种施工装置,即温纳四极装置( $\alpha$ )和单边三极装置,分析了两种施工装置的优缺点,以实测视电阻率剖面图和反演视电阻率剖面图进行对比研究,揭示了反演结果的优势,并在反演结果的基础上进行背景电阻率值的剔除,在断层产状判断及其影响区域划分上进行定量解释,验证了高密度电阻率法探测近地表隐伏断层的可行性,为后续施工提供了可靠的地质资料。

**关键词** 高密度电阻率法 近地表 隐伏断层 背景电阻率

**中图分类号** P631; **文献标志码** A

近年来,随着国家基础建设的快速发展,交通基础设施建设基本完善,在建设过程中,地质调查是不可或缺的必要环节,是施工建设的前提条件。然而,在第四系覆盖层的影响下,地下隐伏构造,如断层、裂隙、岩溶等无法被直接观测,需要采用地球物理方法进行间接探测<sup>[1-3]</sup>。在地球物理方法探测隐伏断层的应用中,一般以地震和高密度电阻率法为主,另外一些常用方法包括重力<sup>[4]</sup>、雷达<sup>[5]</sup>、电磁法<sup>[6]</sup>、地球化学<sup>[1]</sup>等。其中,李志祥等<sup>[7]</sup>采用高密度电阻率法、地震勘探方法进行了昆明新国际机场选址工作;柴焯章等<sup>[8]</sup>以银川隐伏活动断层为例,详细介绍了对隐伏断层进行综合探测的研究;王爱国等<sup>[9]</sup>详细介绍了采用电法勘探对隐伏断层探测的方法技术;邓洪亮等<sup>[10]</sup>采用CSAMT法进行隐伏断层超前预报,并联合反演等手段取得较好的探测效果;何正勤等<sup>[11]</sup>在沿海地区采用浅层地震方法进行了隐伏断层勘探工作,对松散层下方隐伏段层的探测工作起到了重要的指导作用;顾勤平等<sup>[12]</sup>以废黄河断层为例,通过多种地震方法联合反演完成了覆盖层下方隐伏断层的精确定位工作;胡刚等<sup>[13]</sup>介绍了井间地

震层析成像方法在隐伏断层探测中的良好效果;李俊杰等<sup>[14]</sup>分析了超高密度电阻率法在隐伏断层检测中的应用;姜国庆等<sup>[15]</sup>以废黄河断裂为例,采用不同装置形式的高密度方法分析了薄覆盖层下方隐伏断裂的响应特征。在上述方法中,常用的探测方法为浅层地震方法和高密度电阻率法。浅层地震方法对波阻抗界面反应灵敏,但其成本高,抗干扰能力较差,易受前部松散层干扰,降低信噪比。高密度电阻率法对低阻异常体反应灵敏,而隐伏断层基本上为导水通道,采用该方法能够有效地反映隐伏断层的基本情况,但是受体积效应影响,很难精确反映隐伏断层产状和具体位置。在实际施工中往往考虑浅层地震和高密度方法结合的综合探测方案,汲取两者优点以期获得更精准的结果。然而,这种方案大大增加了施工成本、降低了施工效率。

如何以单一物探方法有效地检测地下隐伏断层迫在眉睫,以高密度电阻率法为例,因为体积效应,降低了其对隐伏断层的分辨率,在数值模拟过程中,很多学者采用背景场和异常场结合的方案获得总场数据<sup>[16]</sup>。以总场减去背景场即可获得异常场数据。

现以山西某段公路路基检测工程为例,介绍高密度电阻率法对高阻覆盖层下方隐伏断层的检测效果,并采用剔除背景电阻率的方法对断层产状进行精确划分,以期实现对隐伏断层产状和具体位置的精准判断。

2019年1月31日收到

国家重大科技专项

(2016ZX05054013)资助

第一作者简介:刘心路(1993—),男,博士研究生。研究方向:油田、矿产勘探与开发。E-mail:liuxinlu@gig.ac.cn。

\*通信作者简介:李自安(1964—),男,博士,研究员。研究方向:石油与矿产勘探与开发理论及其应用。E-mail:3123688939@qq.com。

# 1 高密度电阻率法基本原理

高密度电阻率法起源于20世纪70年代末期的英国,最早为电测深偏置系统,80年代后期,中国从理论和实践方面进一步研究了高密度电阻率法,并成功研制出仪器设备<sup>[17]</sup>,在工程检测和矿区灾害源探测中应用广泛<sup>[18-24]</sup>。

高密度电阻率法的基本理论与传统的电阻率法完全相同<sup>[25]</sup>,所不同的是高密度电阻率法所采用的观测系统是后者的升级,在一次性对所有电极进行阵列布置的基础上,通过主机自动控制供电、接收电极的变化,根据不同的装置形式,可完成对测线下方某一区域的探测任务,节省大量的时间成本,大大提高了工作效率。

此次勘探采用两种装置形式对比研究,分别为温纳对称四极装置( $\alpha$ )和单边三极装置,如图1所示。

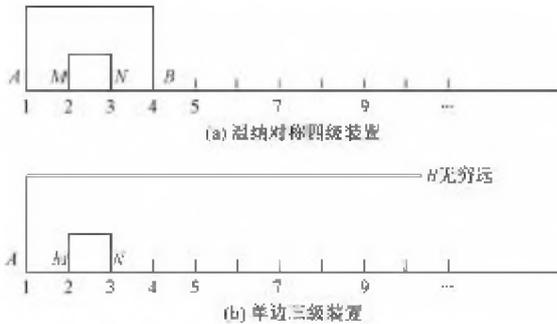


图1 高密度电阻率法装置形式示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-electrode resistivity device

温纳对称四极装置系数为

$$K = 2\pi nr \tag{1}$$

单边三极装置系数为

$$K = 2\pi n(n+1)r \tag{2}$$

式中: $r$ 为电极间距, $n$ 为隔离系数。

视电阻率计算公式均为

$$\rho_s = K \cdot \Delta U / I \tag{3}$$

式(3)中: $\rho_s$ 为视电阻率, $\Delta U$ 为 $M$ 和 $N$ 之间的电位差; $I$ 为电流。

# 2 数值分析

## 2.1 有限差分法正演原理

采用有限差分法对二维地电模型进行正演计算,有限差分方法的基本思想是先把问题的定义域进行网格剖分,然后在网格点上,按适当的数值微分公式把定解问题中的微商换成差商,从而把原问题离散化为差分格式,进而求出数值解。对于二维模型,由于仅需对 $x$ 和 $z$ 方向进行剖分,故采用矩形网

络剖分方式(图2),设 $x$ 方向节点编号为 $1, 2, \dots, N$ , $z$ 方向节点编号为 $1, 2, \dots, M$ 。节点 $(i, j)$ 到节点 $(i+1, j)$ 的距离为 $\Delta X_i$ ,节点 $(i, j)$ 到节点 $(i, j+1)$ 的距离为 $\Delta Z_j$ 。

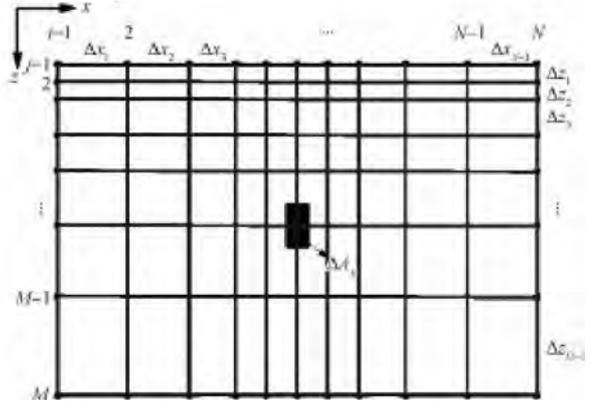


图2 有限差分法网格剖分示意图

Fig.2 Mesh subdivision of finite difference method

设节点 $(i, j)$ 代表一个它附近的网络区域 $\Delta A_{ij}$ ,则

$$\Delta A_{ij} = (\Delta X_i + \Delta X_{i-1})(\Delta Z_j + \Delta Z_{j-1})/4 \tag{4}$$

对于地面上的节点,有

$$\Delta A_{ij} = (\Delta X_i + \Delta X_{i-1})(\Delta Z_j)/4 \tag{5}$$

对于内部节点通常采用的差分方程为

$$C_L^{ij}\varphi_{(i-1,j)} + C_R^{ij}\varphi_{(i+1,j)} + C_T^{ij}\varphi_{(i,j-1)} + C_B^{ij}\varphi_{(i,j+1)} + C_P^{ij}\varphi_{i,j} = \frac{I}{2}\delta(x-x_0)\delta(z-z_0) \tag{6}$$

式(6)中: $C_L^{ij}$ 为节点 $(i, j)$ 和节点 $(i-1, j)$ 的混合系数; $C_R^{ij}$ 为节点 $(i, j)$ 和节点 $(i+1, j)$ 的混合系数; $C_T^{ij}$ 为节点 $(i, j)$ 和节点 $(i, j-1)$ 的混合系数; $C_B^{ij}$ 为节点 $(i, j)$ 和节点 $(i, j+1)$ 的混合系数; $C_P^{ij}$ 为节点 $(i, j)$ 的自伴随系数,可见节点 $(i, j)$ 的 $\Phi$ 只与相邻节点的 $\Phi$ 有关。

对于边界节点,通过对应的边界条件同样可以得到类似的差分方程。对于所有的网络节点,联立可得 $M \times N$ 的线性方程式<sup>[25]</sup>,简写的矩阵方式为

$$C\varphi = S \tag{7}$$

式(7)中:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1,MN} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2,MN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{MN,1} & C_{MN,2} & \dots & C_{MN,MN} \end{bmatrix},$$

为正定和对角占优的稀疏带状矩阵; $\varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{MN}]^T$ 为各节点 $\Phi$ 组成的列向量; $S = [0 \dots 0 \dots S_1 \dots 0 \dots 0]^T$ 为与供电电流有关的列向量,只在供电节点处有值 $S_i = I/2$  or  $I$ ,其余元素值为0。

求解式(7)的线性方程组,得到各网络节点的

波数域电位值  $\Phi$ , 然后通过反傅氏变换得到空间域各节点的电位  $U(i, j)$ , 从而利用测量电极所在位置的  $U_M$  和  $U_N$  得出视电阻率  $\rho_s$ 。

## 2.2 阻尼最小二乘法反演原理

高密度电阻率法反演是基于正演计算进行的。设地电模型的待求电阻率参数为  $\rho = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m]^T$ ; 观测视电阻率数据为  $\rho^{\text{obs}} = [\rho_1^{\text{obs}}, \rho_2^{\text{obs}}, \dots, \rho_n^{\text{obs}}]^T$ ; 正演计算结果为  $\rho^{\text{cal}} = [\rho_1^{\text{cal}}, \rho_2^{\text{cal}}, \dots, \rho_n^{\text{cal}}]^T$ ,  $m$  为有限差分网格数量,  $n$  为观测视电阻率及正演计算数据的数量。

高密度电阻率法的反演过程就是通过不断修改地电模型参数, 使实测视电阻率值与正演计算所得值之间的误差满足一定的精度要求, 一般采用迭代目标函数为对数型拟合方差函数  $F^{[2]}$ , 即

$$F = \sum_{i=1}^n [\ln \rho_i^{\text{obs}} - \ln \rho_i^{\text{cal}}]^2 = \min \text{ or } \leq \varepsilon \quad (8)$$

式(8)中:  $\varepsilon$  为给定的迭代误差。

将上述方程(8)进行线性化处理, 并正则化可得如下称为目标函数  $F$  的方程:

$$A^T A \Delta \rho = A^T \Delta G \quad (9)$$

式(9)中:  $A$  为雅可比矩阵;  $\Delta \rho$  为模型参数修正量;  $\Delta G$  为观测视电阻率值与正演计算所得视电阻率值的残差向量。

为解决法方程中系数矩阵  $A^T A$  的病态及奇异问题, 采用阻尼最小二乘法进行反演计算, 即将阻尼因子  $\alpha$  引入到反演方程<sup>[25]</sup>, 如下:

$$(A^T A + \alpha) \Delta \rho = A^T \Delta G \quad (10)$$

反演过程中通过求解式(10)得到模型的电阻率参数修正量  $\Delta \rho$ , 将模型电阻率参数修改为

$$\rho_{k+1} = \rho_k + \Delta \rho$$

继续进行迭代, 直至满足精度要求。

## 2.3 断层模型正反演分析

对含正断层的地球物理模型进行数值模拟, 并对计算所得数据进行反演计算, 得出视电阻率剖面图。图3为含断层地球物理模型示意图, 覆盖层电阻率为  $200 \Omega \cdot \text{m}$ , 断层带电阻率为  $10 \Omega \cdot \text{m}$ , 断层上、下盘电阻率均为  $500 \Omega \cdot \text{m}$ , 在地面布置  $500 \text{ m}$  长的测线, 每隔  $25 \text{ m}$  布置一个电极, 共计  $21$  个电极, 观测装置采用单边三极装置。

图4为在2.1节和2.2节所述模型条件下计算并反演所得视电阻率剖面图。由图可知, 反演结果和图3中地球物理模型基本一致, 可以清晰地观察到断层所在位置, 覆盖层厚度有模型基本一致, 断层上、下盘被良好的区分, 断层的倾向被正确的揭露。因此, 采用高密度电阻率法探测覆盖层下方隐伏断层是可行的。

基于上述分析可知, 正演数据的反演结果能较好地反映隐伏断层的基本形态, 然而在实际应用中理想模型是不存在的。基于正演模拟中总场等于背景场与异常场之和的理论, 通过式(11)计算出近似的背景电阻率, 而后通过式(12)计算出异常电阻率与背景电阻率的相对差异, 以期通过消除背景电阻率的影响进而突出断层的特性。

$$\rho_{\text{Background}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \rho_{\text{Inverted}} \quad (11)$$

式(11)中:  $m$  为同一深度网格节点数。

$$\text{相对差异} = \frac{\rho_{\text{Inverted}} - \rho_{\text{Background}}}{\rho_{\text{Background}}} \quad (12)$$

图5为剔除背景电阻率后获得的相对差异图。由图可知, 隐伏断层产状、所在位置均被准确地反映, 验证了该处理方法的有效性和可取性, 在常规方法无法判断异常特征时, 此法或可解决高密度资料解释中遇到的些许困境。

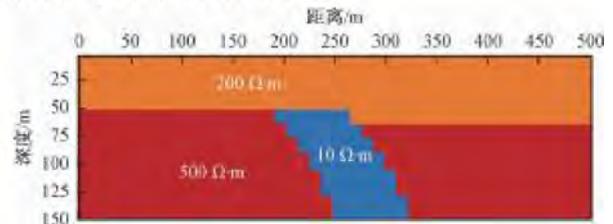


图3 含断层地球物理模型示意图

Fig. 3 Model schematic

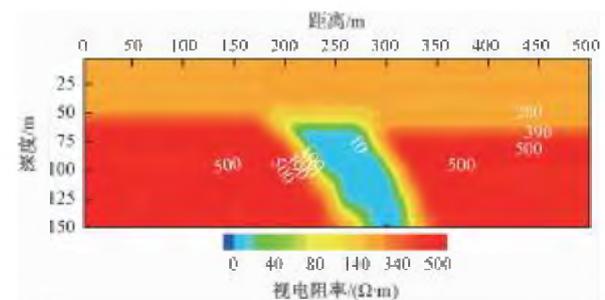


图4 视电阻率剖面图

Fig. 4 Apparent resistivity profile

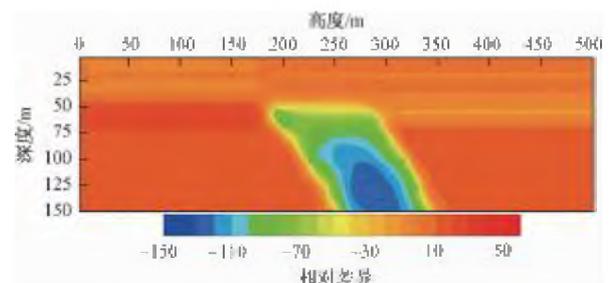


图5 反演结果与背景电阻率的相对差异图

Fig. 5 Comparison of the relative difference between the inversion result and the background resistivity

### 3 应用实例

#### 3.1 工程概况及施工方法

山西忻州 305 省道宁武县至北辛窑段,地形平缓,第四系覆盖层厚度 20 m 左右,覆盖层下方为基岩,因常年经运煤车辆碾压,道路严重破损,存在较多坑洼处,且道路较窄,因此,计划在原有基础上重修并加宽,由于缺少相应的地质资料,故布置了勘探任务,旨在查明地下 50 m 以内的地质情况,特别是土洞、软土、隐伏断层等具体位置,为后续施工和公路维护提供可靠的地质资料。现以在该段公路检测到的某一段层为例,分析高密度电阻率法在探测近地表隐伏断层中的应用效果。

此次勘探工作采用重庆地质仪器厂研发的 DUK—2 高密度电阻率法测量系统,该系统由 DZD—6 多功能直流仪和多路电极转换器组成,具有高分辨率、高效率的特点。实际工作采用 360 V 直流电源供电,供电脉宽为 0.5 s,供电周期为 1 s,施工装置为温纳四极和单边三极装置(图 1),其余施工参数见表 1。

表 1 施工参数

Table 1 Construction parameters

参数	温纳四极	单边三极
电极间距/m	5.0	5.0
电极总数	72	72
测线长度/m	355	355
最大隔离系数	20	20
数据点数	810	2 040

#### 3.2 探测结果分析

高密度电阻率法的最重要的解释手段是视电阻率剖面图,包括实测视电阻率剖面图和反演得到的视电阻率剖面图。

图 6 为实测视电阻率剖面图。图 6(a)为温纳对称四极视电阻率剖面图,由图可知,在横向 175 m 附近存在等值线急剧下降现象,仅能说明地层在此处存在较大起伏,若无详细地质资料,无法判断其是否为断层引起;图 6(b)为单边三极视电阻率剖面图,由图可知,在横向 150 m、深度 45 m 附近存在相对低阻异常区域,其上为第四系覆盖层,地层相对平缓,结合已知地质资料,推测该相对低阻异常区域存在断层,但是无法判断断层的倾向和类别。

图 7 为在实测数据的基础上反演所得视电阻率剖面图。图 7(a)为温纳对称四极视电阻率剖面图,由图可知,在地下 30 ~ 50 m 存在地形起伏,然而这并不能直接推测为断层引起,无法排除正常地形起伏的影响;图 7(b)为单边三极视电阻率剖面图,由

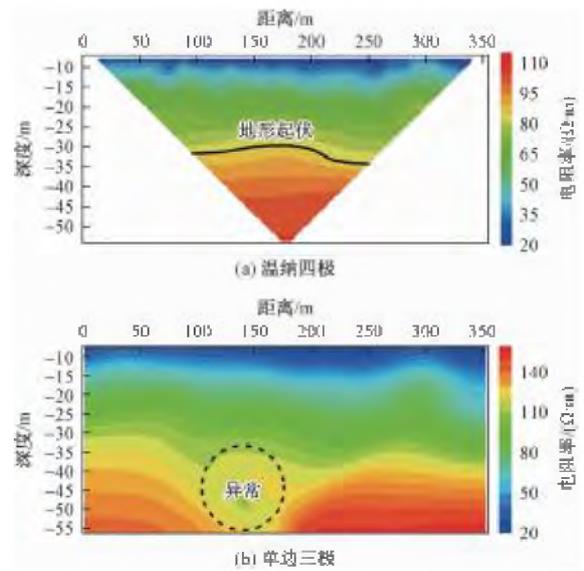


图 6 实测视电阻率剖面图

Fig. 6 Measured apparent resistivity profile

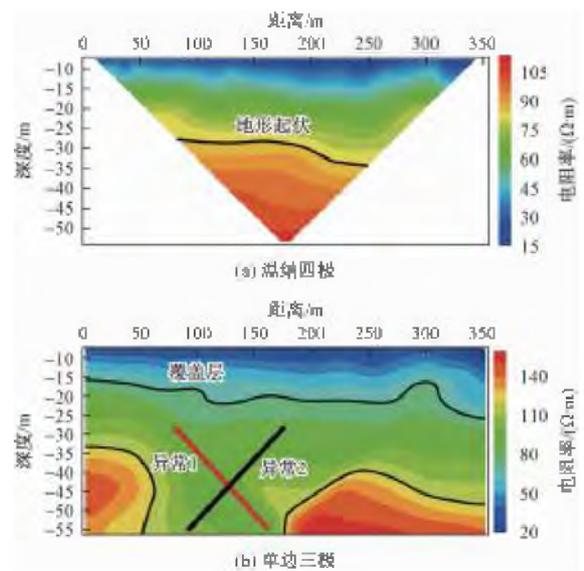


图 7 反演计算所得视电阻率剖面图

Fig. 7 Apparent resistivity profile of inversion calculation

图可知,在地下 20 m 附近存在较为明显的覆盖层与基岩的分界线。在横向 50 ~ 150 m、地下 35 m 以下存在较为明显的相对低阻异常区域,相比图 6(b)中对应的异常区域,该异常区域更为明显地表明了断层破碎带的特征,松散、含水率较高,且受第四系覆盖层等历史沉积影响形成了较为明显的相对低阻异常区域,与上下盘相对高阻的岩层形成对比,但是仍不能准确地判断断层的倾向和类别。

如果推测为 1 号断层,则断层为逆断层;如果推测为 2 号断层,则断层为正断层。就本次试验而言,在没有钻孔验证的情况下,如果仅仅以视电阻率剖面图进行断层类型的推测,无疑是不严谨的。两种

断层对应的地表出露点分别位于 0 ~ 50 m、200 ~ 250 m 附近,那么在后续道路维修和加宽过程中需要治理的位置将受到极大影响,很有可能产生误导,进而造成不必要的损失。

图 8 为在式(11)和式(12)的基础上计算所得的相对差异图。由图可知,“0”等值线表示反演结果与背景值相同的点的连线,可用来表征断层破碎带的边界,据此可较为准确地判断断层倾向,结合图 7(b)中断层破碎带两侧地层的层位特征,可知该断层为正断层,推测为 2 号断层。在图 8 中还可以看到相对差异值较强的强破碎带、地表受破坏后经雨水渗透产生的相对异常区域以及覆盖层在断层带的影响之下较两侧松散度更高、渗水性更高。

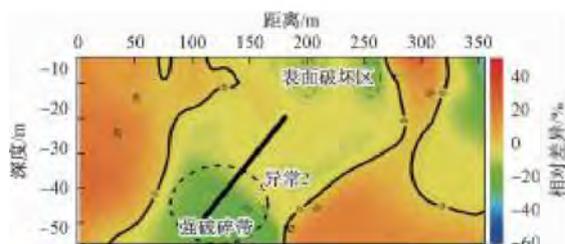


图 8 反演结果与背景电阻率的相对差异图

Fig. 8 Comparison of the relative difference between the inversion result and the background resistivity

由工程应用结果可知,通过剔除背景电阻率获得异常电阻率和背景电阻率的相对差异,有助于判断隐伏断层的产状和位置,在一定程度上补充了反演所得视电阻率剖面图的不足;并且有助于判断因低阻地层影响而无法清晰观测到的低阻异常体,如含水松散层中包含的渗水、积水区域等。

## 4 结论

(1) 高密度电阻率法在探测近地表覆盖层下方地质构造方面具有较大的优势,既可以较为清晰地展现覆盖层的厚度、起伏情况,又可以反映出覆盖层下方隐伏构造的特点。

(2) 温纳四极装置具有较好的稳定性,抗干扰能力强,但是在对隐伏断层反映的灵敏度上弱于单边三极装置,且其探测范围较小,通过多种装置形式对比研究,可以更好地实现对隐伏断层的探测,为后续治理和施工建设提供可靠地地质资料。

(3) 鉴于地球物理方法的多解性,高密度电阻率法在解释断层特征时,不能仅依据视电阻率剖面图,往往需要借鉴更多的地质资料。但在没有充分资料的情况下,利用数学方法提取近似的背景电阻率值,进而比较反演结果与其的差异性不失为一种有效地处理和解释手段。

(4) 随着科技的快速发展,高密度电阻率法的探测深度、施工方法、分辨率等将得到进一步的提高,以便实现更为精细的勘探要求以及达到更高的工作效率,为近地表灾害防治提供更为可靠的依据。

## 参 考 文 献

- 尹志清,刘福兴. 浅层断层探测技术及工程应用[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(7): 103-114  
Yin Zhiqing, Liu Fuxing. Shallow faults exploration technology and its engineering application[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(7): 103-114
- 吴小平. 非平坦地形条件下电阻率三维反演[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 932-936  
Wu Xiaoping. 3-D resistivity inversion under the condition of uneven terrain[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(4): 932-936
- 底青云,倪大来,王若,等. 高密度电阻率成像[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(2): 323-326  
Di Qingyun, Ni Dalai, Wang Ruo, et al. High-density resistivity image[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(2): 323-326
- Abbott R E, Louie J N. Depth to bedrock using gravimetry in the Reno and Carson City, Nevada, area basins[J]. Geophysics, 2000, 65(2): 340-350
- Suzuki K, Toda S, Kusunoki K, et al. Case studies of electrical and electromagnetic methods applied to mapping active faults beneath the thick Quaternary[J]. Engineering Geology, 2000, 56: 29-45
- Unsworth M J, Egbert G D, Booker J R. High-resolution electromagnetic imaging of the San Andreas fault in central California[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104:1131-1150
- 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  
Li Zhixiang, Mao Xianjin, Han Ming, et al. An application of high-density resistivity method to surveying blind fault[J]. Journal of Seismological Research, 2003, 26(3): 275-278
- 柴炽章,孟广魁,杜鹏,等. 隐伏活动断层的多层次综合探测——以银川隐伏活动断层为例[J]. 地震地质, 2006, 28(4): 536-546  
Chai Chizhang, Meng Guangkui, Du Peng, et al. Comprehensive multi-level exploration of buried active fault: an example of Yinchuan buried active fault[J]. Seismology and Geology, 2006, 28(4): 536-546
- 王爱国,马巍,张向红,等. 隐伏断层电性特征及浅层电法探测[J]. 西北地震学报, 2006, 28(3): 242-247  
Wang Aiguo, Ma Wei, Zhang Xianghong, et al. Electrical characteristics of buried fault and prospecting by superficial direct-current electrical method[J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(3): 242-247
- 邓洪亮,谢向文,郭玉松. 南水北调西线隧道中隐伏断层超前预报研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1948-1954  
Deng Hongliang, Xie Xiangwen, Guo Yusong. The study of geological forecast to deeply buried tunnel fault in South-North Water Transfer West Route project[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(6): 1948-1954
- 何正勤,陈宇坤,叶太兰,等. 浅层地震勘探在沿海地区隐伏断层探测中的应用[J]. 地震地质, 2007, 29(2): 363-372

- He Zhengqin, Chen Yukun, Ye Tailan, et al. Application of shallow seismic exploration in detection of buried fault in coastal areas [J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(2):363-372
- 12 顾勤平, 康清清, 许汉刚, 等. 薄覆盖层地区隐伏断层及其上断点探测的地震方法技术——以废黄河断层为例[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(5): 1609-1618
- Gu Qiping, Kang Qingqing, Xu Hangang, et al. Seismic exploration methods for buried faults and its up-breakpoint in thin sediment areas; an example of the Feihuanghe fault [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5): 1609-1618
- 13 胡刚, 段宝平, 何正勤, 等. 利用井间地震层析成像方法探测隐伏断层[J]. *CT理论与应用研究*, 2015, 24(3): 345-355
- Hu Gang, Duan Baoping, He Zhengqin, et al. Application of crosswell seismic tomography in detecting buried fault [J]. *CT Theory and Applications*, 2015, 24(3): 345-355
- 14 李俊杰, 何建设, 严家斌, 等. 超高密度电阻率法在隐伏断层探测中的应用[J]. *物探与化探*, 2016, 40(3): 624-628
- Li Junjie, He Jianshe, Yan Jiabin, et al. The application of ultrahigh density resistivity method to the detection of buried fault [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40(3): 624-628
- 15 姜国庆, 徐士银, 金永念, 等. 薄覆盖层隐伏断层电场响应特征研究——以废黄河断裂为例[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(4): 1824-1833
- Jiang Guoqing, Xu Shiyin, Jin Yongnian, et al. Electric field response characteristics of buried fault with thin overburden layer—the example of Feihuanghe fault [J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(4): 1824-1833
- 16 潘克家, 汤井田. 2.5维直流电法正演中 Fourier 逆变换离散波数的最优化选取[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(7): 2819-2826
- Pan Kejia, Tang Jingtian. Optimized selection of discrete wavenumbers for inverse Fourier transform in 2.5D DC resistivity modeling [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(7): 2819-2826
- 17 刘光鼎. 发展地球立体探测技术, 提高地学仪器装备水平[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(11): 3607-3609
- Liu Guangding. Developing earth exploration technology in three dimension, improving the performance of instruments for geosciences [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(11): 3607-3609
- 18 刘树才, 刘志新, 姜志海, 等. 矿井直流电法三维正演计算的若干问题[J]. *物探与化探*, 2004, 28(2): 170-172, 176
- Liu Shucai, Liu Zhixin, Jiang Zhihai, et al. Some problems in 3D forward simulation of mine direct current method [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2004, 28(2): 170-172, 176
- 19 罗延钟. 高密度电阻率法的 2.5 维反演软件[J]. *物探化探计算技术*, 2006, 28(3): 187-193
- Luo Yanzhong. 2.5-D inversion software for high density resistivity [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2006, 28(3): 187-193
- 20 程巍, 傅焰林, 李振宇. 高密度电阻率法在查明潜伏断裂中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2011, 8(4): 417-420
- Cheng Miao, Fu Yanlin, Li Zhenyu. Application of high density resistivity method to hidden fault investigation [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2011, 8(4): 417-420
- 21 罗登贵, 刘江平, 王京, 等. 活动断层高密度电阻率法响应特征与应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(4): 1920-1925
- Luo Denggui, Liu Jiangping, Wang Jing, et al. Study on the response characteristics and application of high density resistivity method of active fault [J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(4): 1920-1925
- 22 王诗东, 虞先国, 李怀良, 等. 氡气测量法-高密度电阻率法在断层定位中的应用[J]. *地学前缘*, 2011, 18(2): 315-320
- Wang Shidong, Tu Xianguo, Li Huailiang, et al. The application of radon measurement method and high-density electrical method in the exploration of the fault location [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(2): 315-320
- 23 高武平, 陈宇坤, 张文朋, 等. 高密度电阻率法在西藏日喀则地区隐伏断裂探测中的应用[J]. *地震学报*, 2016, 38(5): 776-784
- Gao Wuping, Chen Yukong, Zhang Wenpeng, et al. Application of high density resistivity method to exploring buried faults in Rigaze region of Tibet [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2016, 38(5): 776-784
- 24 岳建华, 薛国强. 中国煤炭电法勘探 36 年发展回顾[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(4): 1716-1724
- Yue Jianhua, Xue Guoqiang. Review on the development of Chinese coal electric and electromagnetic prospecting during past 36 years [J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(4): 1716-1724
- 25 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005
- Li Jinming. *Electric field and electrical prospecting* [M]. Beijing: Geoelectric Field and Electrical Exploration, 2005

## Application of Multi-electrode Resistivity Method to Detect the Near-surface Buried Fault

LIU Xin-lu<sup>1,2</sup>, LI Zi-an<sup>3\*</sup>, LIANG Ying-jie<sup>1,2</sup>

(Key Lab of Mineral and Mineralization, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences<sup>1</sup>, Guangzhou 510640, China; University of Chinese Academy of Sciences<sup>2</sup>, Beijing 100049, China; School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University<sup>3</sup>, Guangzhou 510006, China)

[**Abstract**] Buried faults pose a major threat to roads, foundations, etc. Multi-electrode resistivity method is an indirect geophysical method for detecting underground structures and electrical anomalies based on the difference of resistivity between strata. In recent years, it has been widely used in near-surface detection. Based on this, firstly, the forward of a fault model was carried out. Then, taking the subgrade detection of a section of highway in Shanxi as an example, the basic principle of multi-electrode resistivity method and two common construction devices was briefly introduced, namely winner quadrupole device ( $\alpha$ ) and single-side tripolar device, and the advantages and disadvantages of the two construction devices were analyzed, and the measured apparent resistivity profile with the inverted apparent resistivity profile was compared. Finally, on the basis of the inverted results, the background resistivity value was removed, and the quantitative interpretation was made on the judgment of the fault occurrence and the division of the affected area. The study reveals the advantages of inversion results, verifies the feasibility of multi-electrode resistivity method for detecting near-surface concealed faults, and provides reliable geological data for following construction.

[**Key words**] multi-electrode resistivity method    near-surface    buried fault    background resistivity