

文章编号: 1006-4710(2012)03-0345-07

瞬变电磁法小线框技术研究及其应用

杨农合¹, 徐小林², 吴朝俊³, 杨宁宁³

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省地质矿产勘查开发局 西安地质矿产勘查开发院, 陕西 西安 710100;

3. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 瞬变电磁法在我国的应用一直是 100~200 m 线框的装置, 在山区和地形复杂的地区勘探或在城镇地区的地面高层建筑和地下工程的基础勘察时, 此装置线圈敷设困难, 施工难度大, 效率低。TEM 小线框的出现使得施工快速轻便, 与此同时还发现了新的探测隐伏断层的技术方法, 断层点定位准确。本文着重分析 TEM 小线框的特性及利用其探测隐伏断层的原理, 并通过工程勘察实例说明 TEM 小线框的横向分辨率高和效率高的优点。

关键词: 瞬变电磁法; 小线框; 断层构造; 数据处理

中图分类号: P631.3⁺25 **文献标志码:** A

Transient Electro-Magnetic Method(TEM) Small Coil Technology and Its Application

YANG Nonghe¹, XU Xiaolin², WU Chaojun³, YANG Ningning³

(1. Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Geology Minerals Investigation Development Courtyard, Xi'an 710100, China;

3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Transient electro-magnetic methods (TEM) used in our country has been a device with 100~200 m long wire coil. When the surveys are carried out in the mountain areas and the complicated topographic areas and when the base investments are conducted in the ground high storeyed buildings and the underground engineering in the urban areas, coil laying in this device is difficult with difficult construction and low efficiency. In order to solve this problem, TEM small coil is designed so as to make the construction become fast and easy, and at the same time, the technical method to detect the concealed faults is found so that the fault point positioning is accurate. This paper mainly analyzes the performances of TEM small coil and its principles of detecting the concealed faults. The real cases of engineering investigation indicate that TEM small coil is of the horizontal high resolution and high efficiency.

Key words: Transient Electro-Magnetic Method; small coil; fault structure; data processing

瞬变电磁法于 1951 年由前苏联科学家首先提出并实现, 经过西方科学家的努力, 于 1962 年实现了空中的 INPUT 系统, 地面系统则是在上世纪七十年代由美国和加拿大推出应用。我国在上世纪七十年代末才开始关注和投入研究。瞬变电磁法从问世以来取得了很好良好的勘测效果。近几年来, 我国的地面瞬变电磁法勘探技术已由实验阶段进入生产

阶段, 并已在煤炭煤田开采、高速路基隧道、桥梁选线、地热勘探、金属矿产勘探、灾害地质探测领域被大量应用, 且取得了可观的效果。但在山地和丘陵环境此应用受到山区地形环境的限制和影响。笔者在近 10 多年的时间里对瞬变电磁法在理论和实际应用方面做了大量的实验和研究, 提出并实现了 3 m 小线框的重叠回线装置并研制了对应的工程勘

收稿日期: 2012-04-18

作者简介: 杨农合(1955-), 男, 高级工程师, 研究方向为瞬变电磁法勘探仪器、勘探方法及数据处理。

E-mail: xa_ynh@163.com。

察仪器,完成了数据处理和资料解释程序,使 TEM 小线框技术进入实用阶段。

1 瞬变电磁法小线框的实现

瞬变电磁法以其发射线圈和接收线圈装置的不同,分为发射线圈和接收线圈具有同一中心点的中心回线型、重叠回线型、大定源回线以及发射线圈和接收线圈的中心相距一定距离的分离回线型。

瞬变电磁法属于时间域电磁感应法,通常是在地面布设发射线圈,加以脉冲电流产生一个瞬变的电磁场,垂直发射线圈向两个方向传播,依据半空间的传播原理,把地面以上的半空间忽略,电流关断时在地下均匀半空间中激励起感应涡流场(等效电流环)来维持在关断电流前的磁场,瞬间集中面电流由地表向地层深部按照发射中心与垂向成 θ 倾角方向向外扩散,在任意时刻 t 可以描述为多层壳的环带形(烟圈),如图 1 所示^[1]。

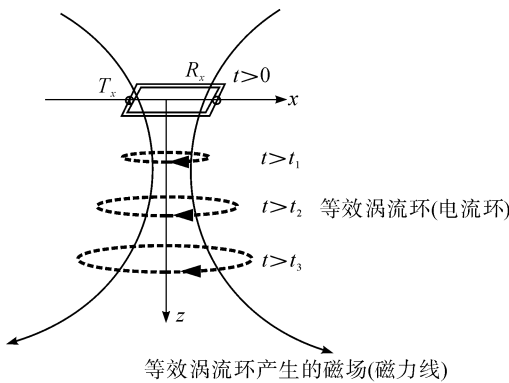


图 1 地下半空间中的等效涡流环
Fig.1 Equivalent vortex ring in an underground semi-space

其等效环电流为:

$$i(t) = \frac{1}{4\pi c_2 [t/(\sigma\mu_0)]} \quad (1)$$

扩散半径 a 和深度 d 为:

$$a = \sqrt{8 \cdot c_2} \cdot \sqrt{t/(\sigma\mu_0)} \quad (2)$$

$$d = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{t/(\sigma\mu_0)} \quad (3)$$

式中, $c_2 = \frac{8}{\pi - 2}$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m 为磁导率, σ 为介质电导率。

由 $\tan \theta = \frac{d}{a} = 1.07$ 可知 $\theta = 47^\circ$ 。感应涡流场(等效电流环)沿着 47° 倾斜锥面向下扩散,其速度为:

$$v_z = \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma\mu_0 t}} \quad (4)$$

从上述公式描述可以看出扩散速度 v_z 与介质电导率 σ 有关,换言之地层的低阻使扩散速度

减慢。

在任意时刻 t 的感应磁场强度为:

$$B(z) = \frac{\mu_0 \cdot M}{30 \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi \cdot t^{3/2}}} (\sigma \cdot \mu_0)^{3/2} \quad (5)$$

式中 $M = S \times N \times I$ 为发射回线磁矩, $S = L^2 \times N$ 为发射回线的面积, N 为匝数, I 为供电电流强度, L 为发射边框的边长。

此时在位于和发射线圈在同一中心点的接收线圈内接收到的对应于 t 时刻的感应电动势为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\mu_0^{5/2} \cdot I \cdot S \cdot A_R}{20 \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi} \cdot \rho^{3/2} \cdot t^{5/2}} \quad (6)$$

式中 A_R 为接收回线的面积, $\rho = \frac{1}{\sigma}$ 为地层电阻率。

地层高低阻响应曲线如图 2 所示。

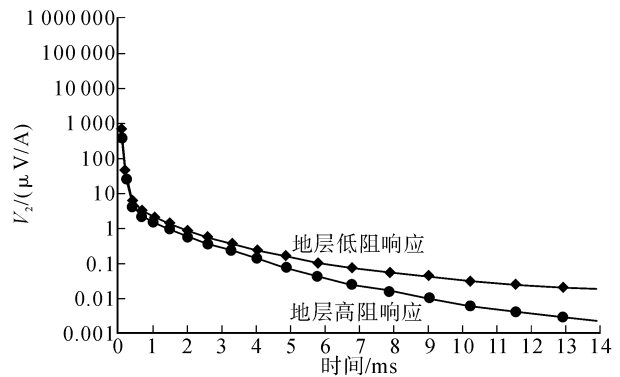


图 2 接收的感应电动势 V_2
Fig.2 Received induction electromotive force V_2

从图 2 可以看出,地层的低阻响应曲线要比高阻响应值高,说明涡流场扩散的速度受低阻影响减慢,这也是遇到低阻层后产生的低阻屏蔽现象,和上述公式描述一致,也是寻找金属矿产和构造的基础条件。

瞬变电磁法的标准装置是边长为 200 m^[2] 的正方形边框,发射电流 10 ~ 30 A 左右,这种装置在山区和村镇城区难以敷设线框,且容易受到地形限制和干扰,使得 TEM 的应用受到一定限制。减小装置尺寸一直是应用层面迫切希望解决的问题。

从公式(5)可以看出,只要保证发射磁矩足够大,就能实现减小发射线框边长的目的,这是实现小线框装置的关键,发射磁矩 $M = S \times N \times I$, S 为发射回线的面积, N 为匝数, I 为发射电流强度。由此可以看出若想要保持一定的发射磁矩还要减少发射线框面积 S ,有两种方式可实现,一种增大发射电流,另一种是增加发射线圈匝数 N 。刘显耀通过增大发射电流(600 ~ 1 800 A)实现了小线框装置^[3],国外仪器则是通过增加发射线圈匝数来实现小线框装置。这两种方式的特点是,大电流模式是采用单匝

发射线框,受关断效应影响很小,但对发射装置要求高。多匝发射线圈采用10~40 A电流,对发射装置要求低,但由于其几十匝线圈的结构产生了不容忽视的电感,由于电感阻碍电流的变化,使得关断时产生一个电流延迟(关断时间)的影响,这个延迟不仅与发射线圈匝数形成的电感有关,还与地表的电阻率有关,需在后续处理和解释时加以校正。

中心回线是采用多匝线圈加上磁芯构成的探头组成,优点是体积小,接收中心点的信号。但是容易受到其他电磁信号干扰,更容易受到露出地面的磁性矿体、碳质岩类或金属堆积物的影响,笔者在某铅锌矿区做实验时遇到过地面的碳质页岩出露使得测量数据可信度降低的情况,工程勘察时则更易受到地下水管的影响。重叠回线的优点是接收面积大,体积效应明显,改进后增加接收线圈匝数,使得信号强度增大,信号对比度提高。

通过长期的大量的实验(选择不同的边框和接收装置,在不同地区和不同的地质条件如围岩构造、各种矿区进行对比试验),最后在兼顾各种地质条件,既要方便野外施工还要保证接收信号质量要求下,确定了本文的小线框装置的选择和边长,即边框边长为3 m的折叠线圈的重叠回线装置,发射为3 m边长的正方形单匝线圈,接收为边长3 m的正方形多匝线圈,发射电流在400 A以上(以保证有效的发射磁矩)。

大回线源是标准的瞬变电磁法的测量装置,在100~200 m边长的边框装置下,在高阻地区探测的深度可以达到1 000~2 000 m。对探测一定规模体积的金属矿产效果非常好。

3 m小线框可以归类于小回线源场,和大回线源相比,由于发射与接收面积小,所以横向分辨率要高于大回线源装置,对于构造类反应强烈,定位准确,对工程勘察和地质灾害探测如断层、采空、塌陷、岩溶或者小规模金属矿产探测效果明显,施工方便且效率高,受地形影响小。不足之处是容易受地面或浅层低阻影响,探测深度要低于大回线源。

2 瞬变电磁法小线框的野外工作方法

瞬变电磁法小线框的特点是抗干扰能力强、横向分辨率高、工作方便,其探测目的可以分为两大类,一类是寻找金属矿产和热、凉水资源方面,另一类是工程勘察、地质灾害调查^[4]。根据这两类不同性质的勘探目的,在设计野外工作规则时必须加以区别。在勘探金属矿产、水资源时,考虑到开采的价值成本和储量,则测线和测点间距可以适当放宽,常

以20~40 m为多。对应异常的判断多以“疑似从无”考虑,主要是考虑成矿体积及开采价值和成本的关系。

而在工程勘察、地质灾害调查时,断层^[5]和塌陷是探测的重要目标^[6],合理地设置测线和测量点距是非常重要的,在测线和测点间距必须保证以不漏灾害体为准则,常以3~10 m为多,尤其在采空区调查时必须选择最小间距,因为地下巷道的宽度仅为1~2 m,间距过大就会将地下巷道越过,造成严重的后果。同样在探测断层结构和岩溶时,对断层构造走向和岩溶通道分布也要保证最小的测点距离。根据现场踏勘和测区的已有地质资料估计目标的大致走向,垂直方向相交布设测线,测线、测点间距要合适,确保异常不会被漏掉。测线间距应保证在异常走向上至少要有2条以上的测线穿越。测点号应设置为里程点号(米数点号)为好,当异常出现时而加密测点时,可以方便地加入新的点号。在具体定位时可以采用1 m点距。在工程勘察、地质灾害勘察时,对应异常的判断要以“疑似从有”考虑,主要是考虑安全避让距离和而后的建筑物的安全。

野外测量时必须做纸质记录,记录测点时间、地点、电流和测点周围环境,尤其对建筑物、金属结构物和供电线路、供水管道,因为这些都是会引起假异常和干扰的源。需要在数据处理时加以排除,避免误判。

在测区内先要做实验确定发射电流和发射供电磁矩方向,因为在不同地区和不同地质条件下效果不一样,在高纬度地区地磁场的垂直分量起主要作用,在低纬度的地区水平分量起重要作用,要根据实验确定发射磁矩方向。第四系覆盖层的厚度决定表层电阻率特性,发射电流要根据探测深度确定,对较浅的目标,则可选择小电流,探测深的目标时则用大电流,发射电流和发射供电磁矩方向一旦确定,在本测区内不能改变,否则会引起假异常出现,造成数据质量误差,通过实验和观察曲线形态获得最佳的工作参数。

当检测到异常时,需要加密测点。需要时可以增加跨越异常的辅助测线,新加的跨越异常的辅助测线起点应从异常点前的3个正常点位置开始,终点在跨越异常后的3个正常点位置。从而保证测线数据的可对比性以提高解释程度。记录异常点坐标(据此画出断层走向)。当断层特征(V_2 响应曲线产生负值畸变)出现时,小距离移动测点,使 V_2 响应曲线正常,记录该点坐标,数据处理时用该点加入测线替代畸变点计算视电阻率和一维反演电阻率。在多

测道剖面分析时以畸变点为主,根据单峰、双峰异常的变化趋势,按倾斜导电薄板特征分析断层倾角,并计算出近似的倾角。

在异常点,至少应退后一点做重复观测,而后再一次检查异常点,确保异常点是经过重复观测,质量可靠。其退后一点和检查的异常点可以作为质量检查点记录。

当遇到周边有大的金属体或地下的采掘工程面的金属设备时,所测到的数据则不能反映真实的地质情况,此时应补充其它物探方法或用钻孔对异常区进行必要的验证。由于同一地区的地层、构造存在差异,要参考所在区域的地质资料和前人成果。

3 瞬变电磁法小线框的数据处理

视电阻率计算公式为:

$$\rho_r(t) = 6.32 \times 10^{-3} \cdot A_R^{2/3} \cdot b^{4/3} \left(\frac{\varepsilon(t)}{I} \right)^{-2/3} \cdot t^{-5/3} \quad (7)$$

计算视纵向电导 S_r 及视探测深度 h_r 的公式为:

$$S_r = \frac{16\pi^{1/3}}{(3M_q)^{1/3} \mu_0^{4/3}} \times \frac{[\varepsilon(t)]^{5/3}}{[\varepsilon'(t)]^{4/3}} \quad (8)$$

$$h_r = \left[\frac{3M_q}{16\pi\varepsilon(t)S_r} \right]^{1/4} - \frac{t}{\mu_0 S_r} \quad (9)$$

式中, M_q 为发送磁距, $M = IL^2$ (单匝), $q = NS_R$ 为接收偶极距。

等效探测深度为:

$$d = 28 \sqrt{\frac{t}{\sigma}} = 28 \sqrt{\rho_a t} \quad (\text{m}) \quad (10)$$

以上的经典计算公式是从标准装置(线框边长 200 m)中的电磁场、回线场和磁偶极子经过各种变换和化简后得到的工程计算公式。

在小线框的数据处理时发现计算视电阻率、视深度、正演、一维反演时误差很大,究其原因发现在小线框装置下(6)式描述的感应电动势和发射磁矩 $I \cdot S$ 与接收线框面积 A_R 的乘积关系并非对应比例关系,刘显耀在 2005 年发现此现象,并经过大量的不同边长的装置和改变不同电流实验,证实没有对应的比例关系,但是针对小线框重新从电磁场开始推导出准确实用工程计算公式和正演、一维反演计算方法并非易事。

刘显耀提出通过用调整等效发射线圈 S 和接收线圈 A_R 面积来修正经典计算公式(6)的方法,从而可以继续使用经典的计算公式,并减小误差。笔者将此细化转为计算处理程序,将已知钻孔作为标准地层,由该钻孔位置的实测数据建立标准地层的模

型,用正演计算感应电动势响应值曲线并与实测曲线比较,通过调整正演模型的边框长度使正演计算感应电动势响应值曲线与实测曲线误差最小并计算偏离校正系数,由此得出新的等效边框长度和校正系数,并对测区内所有的测点数据进行校正。在后续的处理中使用等效边长,这样就解决小线框的数据处理问题,实现了 TEM 小线框技术的有效应用。

由于 TEM 小线框具有横向分辨率高的特点,在测线的测点密度合适的情况下,直接使用多测道剖面,可以快速定性解释并定性推断异常的位置、走向和构造的倾角,从而完成对现场的快速定位和分析。多测道剖面也是最根本的基础处理结果。在测区内按测线和测点坐标,依次将某一指定时间道的 V_2 响应值连接起来构成测区某测道平面图,由此可以识别出低阻异常和高阻异常的分布。

数据处理要遵循野外采集数据的原始性;由原始观测数据建立多测道剖面(定性解释);根据已知的钻孔资料或地质资料建立正演模型及其响应曲线,根据正演模型响应曲线和对应观测点计算出校正系数,并对相应的测线的测点观测数据进行校正和有效测道编辑(只保留有效测道,对开始畸变后的测道数据剪切掉,不要用过多的滤波处理挽救这些测道,否则会带来假性异常);对校正和有效测道编辑后的测点数据进行视电阻率计算处理;根据勘察的要求做一维反演分层处理,经处理后得出野外采集的 V_2 响应值曲线的各条测线的多测道剖面图、各条测线视电阻率剖面图和测区平面图。

在正演计算时要根据已知钻孔测井地层的电性参数,按照地层岩性厚度和电阻率,建立正演模型。最大可以建立 10 层地质模型,对第一层和目标层要尽量准确。一维反演计算的初始模型对第一层和目标层要考虑测区内地形变化,要对目标层及时根据前期做出的多测道剖面 and 视电阻率剖面及时调整模型,使计算出的分层结果符合多测道剖面的变化趋势。所有最终的视电阻率和一维反演分层解释都不能违背多测道剖面的高低阻变化规律,否则没有解释的可信度,换言之没有原始的观测反映变化那么其结果是不可信的。

EMES-3 是单点处理的瞬变电磁法数据处理程序,测点坐标和计算结果加入 excel 的简易数据库,可以由此生成 surfer 格式的剖面图、平面图数据文件。

EMES-4 升级为数据库模式的瞬变电磁法数据处理程序,测量数据是批量入库,批量或单点进行计算和处理的,直接生成 surfer 格式的剖面图、平面图

数据文件,处理速度快。

通过图件所反映的高低阻异常基本电性特征解释地质体的电性特征,从而可推断出地质体的变化规律和区内地层的发育规律以及地质构造大致的赋存规律。

4 瞬变电磁法小线框对断层构造的探测技术原理分析

断层从地下深部断裂至地面,伴随成矿或者形成潜在的地质灾害^[7]。由于地表的变迁使得断层的地面标志越来越少^[8],而地面建筑物被设计得越来越高^[9],地下建筑物越来越多^[10-11],因此查明断层构造十分迫切,以使建筑物在断层处有合理的安全避让距离。

沿断裂面从地面或地下由液体或地面降水携带细小颗粒对断层裂隙充填形成破碎填充体,这个断层裂隙和其填充体在地下半空间是以倾角为 α 角度的薄板形式(板状体)向下延深。并由断层的形成年代决定该填充体(薄板)的电阻率高低,较新的和次新的活动断层的填充体电阻率值较低,古老断层的填充体其裂隙的胶结程度强,电阻率值呈现为高阻;断层处电阻率特性与断层的破碎程度和破碎带宽度、断层处有无其它岩脉侵入以及断层处地下水的富集程度有关,其与断层两侧围岩的电阻率存在差异。

对于隐伏断层的探测和定位一直是工程勘察中的一个难以解决的问题,直接用电阻率差异判别断层具有一定的风险,因为引起电阻率变化差异的因素非常多,其他物探又易受到各种条件限制。

多年来笔者在全国各地的实验中,发现 TEM 小线框在断层构造的探测中有一个非常有效的明显特征^[12],利用该特征方法可以快速、准确地发现断层并精确定位。从而为探测隐伏断层寻找到新的有效手段,大大提高了勘探效率和准确率。

在断层上方位置 V_2 感应电动势出现由正到负的畸变如图 3 所示。

在牛之琏、蒋邦远专著中该现象被描述为“集流的负瞬变电磁响应”^[1-2]。这种断层特征经过了大量的验证,其成因分析如图 4 所示。

在 $t = 0$ 时刻,涡流场等效电流环的扩散速度 $v_z(t)$ 处处相等时,在接收线圈 R_x 中感应磁场强度为 $B(z)$,感应电动势为 $\varepsilon(t)$ 。感应涡流场(等效电流环)以速度 $v_z(t)$ 沿着 θ 倾斜锥面向下扩散。当涡流场等效电流环的扩散速度 $v_z(t)$ 在某处不相等时,即 $|v_{z1}(t) - v_{z2}(t)| \geq \eta$ 时,有:

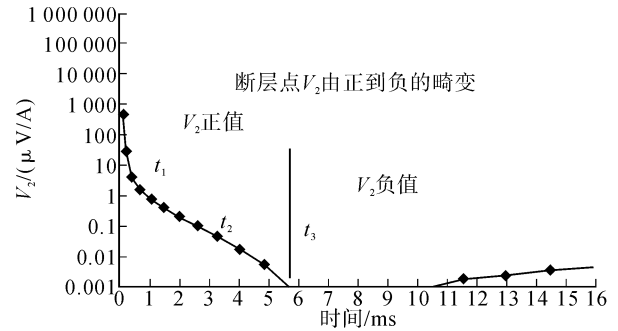


图 3 瞬变电磁法探测断层的特征
Fig. 3 The mechanism of TEM fault survey

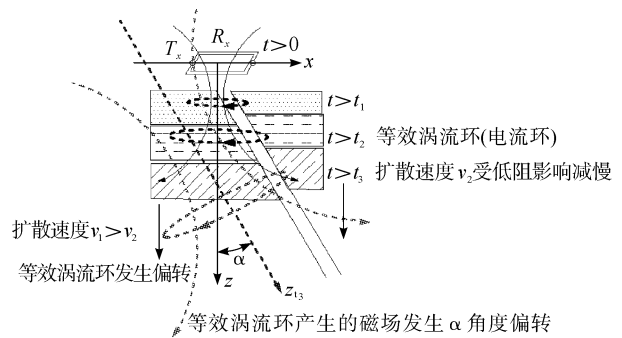


图 4 断层处 V_2 出现负值的成因分析
Fig. 4 Causes of negative value V_2 (Induction of secondary field) at the top of faults

$$\varepsilon(t) = - \frac{\mu_0^{5/2} \cdot M(z) \cdot A_R}{20 \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi} \cdot \rho^{3/2} \cdot t^{5/2}} \quad (11)$$

当发射电流关断后, $t > 0$ 时,涡流场建立并开始向下扩散,在 $t > t_1$ 和 $t > t_2$ 时涡流场等效电流环以速度 v_z 按照沿着 θ 倾斜锥面向下扩散,扩散速度在电流环圆周上各点相同,逐步向下扩散,当遇到断层(低阻)时即 $t > t_3$ 时刻,涡流场的等效电流环一侧接触到断层的低阻区域,低阻使该点的扩散速度减慢,等效电流环在断层位置的部分速度 v_2 降低,而远离断层处的等效电流环另一侧速度不变,使 $v_1 > v_2$,由于等效电流环两侧的扩散速度不一致,扩散的涡流场的等效电流环发生偏转,形成与 z 夹角为 α 的 z_{t_3} 方向,沿此方向继续扩散,当 z_{t_3} 轴向偏离出接收线框后,其等效电流环产生的磁场磁力线也偏离出接收线框,那么在接收线圈的小线框内得到的感应电动势就为负值。

瞬变电磁法小线框大电流装置在隐伏断层出现的集流负瞬变电磁响应物理特征非常明显。通过对接收的感应二次场 V_2 的这个特征的简单判别,可以确定探测隐伏断层的出露位置和走向。

小线框探测隐伏断层的要点:①保证发射电流足够大;②在表层第四系覆盖层较薄(或者高阻围岩)地区,出现 V_2 响应曲线产生负值畸变特征的测点,可判定为断层出露点;③在第四系覆盖层较厚

(几十米到几百米)的地区,由于第四系覆盖层厚且电阻率较低时, $\kappa \leq |v_{z1}(t) - v_{z2}(t)| \leq \eta$, 集流的负瞬变电磁响应特征已经不明显, 表现为带硬拐点高阻响应曲线形式, 要通过多测道剖面的倾斜导电薄板特征分析来确定断层位置。

在断层构造探测中, 测线和测量点距要设置得合理, 避免漏掉异常。测量遇到断层特征时(V_z 响应曲线畸变产生负值)应及时记录该点坐标。根据特征畸变点坐标可画出断层的平面走向图, 确定出断层走向。根据多测道剖面单峰双异常按倾斜导电薄板特征分析出断层倾角, 按点距和时间道计算出近似的断层倾角。

5 瞬变电磁法小线框勘探实例

断裂构造相对于围岩来说, 电性反映为高阻和低阻的差异变化; 其内部充填松散物的电阻率与周围介质相比具有相对高低阻变化, 断裂破碎带充水后与围岩相比为低阻。地表水低阻体都会影响各个地层、地质体的电性特征, 在数据解释的时候应该综合考虑各个因素, 要最大限度地排除干扰, 得出地质体的实际情况。此外, 某个地质体的电性特征在整个纵深剖面上都会有反应, 电阻率剖面图是不同地层、构造以及地质体综合反应的结果, 必须与已知的地质资料相结合, 才能做出符合实际地质概况的推断。

通过分析测区内地质情况(地层成因条件及对应地层的岩性和电性等), 判断隐伏断层的结构、种类和与其对应的电性结构形式。在资料处理和解释时要排除其他干扰因素引起的假异常, 建立合理的正确模型, 采用多种方法处理, 确定出异常测点, 判定隐伏断层出露点。

小线框对断层构造的探测技术在这几年的实践中, 已经获得了良好的效果。例如笔者在 2008 年苏州某地地质塌陷边界探测、2008 年北京门头沟测采空区调查、2009 年江西井冈山地区隐伏断层探测均取得了成功。2009 年河南某矿区探测, 该矿是热液沿断层断裂面填充形成, 已经通过钻探验证。王辉 2008 年在山西霍州布设 28 条测线, 成功探测出了 3 条隐伏断层^[12]。

2010 年在长江某工程中水上 TEM 勘察, 采用小线框技术, 探测出江底 F4—F8 构造, 其中 3 个断层与前期钻探确定位置重合, 新揭示的断层与水上浅层地震结论一致^[13]。

2011 年南方某隧道工程选线初勘工程中一条测线实例: 隧道处地层出露不全, 基岩分布有古生界

泥盆系中下统茅山群(D_{1-2ms})、上统五通组(D_{3w})沉积岩以及中生界侏罗系上统(J_3)喷出岩(岩浆岩)以及燕山早期的次火山岩(岩浆岩)、燕山晚期侵入岩(岩浆岩)。且为某矿主要集中赋存地区, 采矿活动频繁, 历史悠久, 除已开采殆尽的地表矿体外, 地下开采深度从 $-30 \sim -120$ m, 矿区已出现严重的滑坡和采空塌陷地质灾害, 地表已出现明显的地面塌陷区。

通过对多测道剖面和视电阻率剖面分析定性推测出 2 个断层构造, 1 个充水采空与 1 个塌陷边界。如图 5~7 所示。

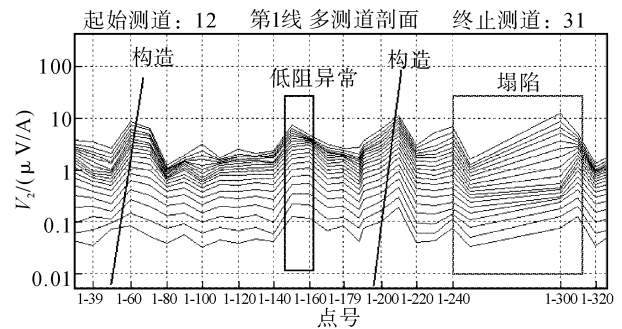


图 5 TEM 多测道剖面
Fig. 5 TEM multi-measurement road profile

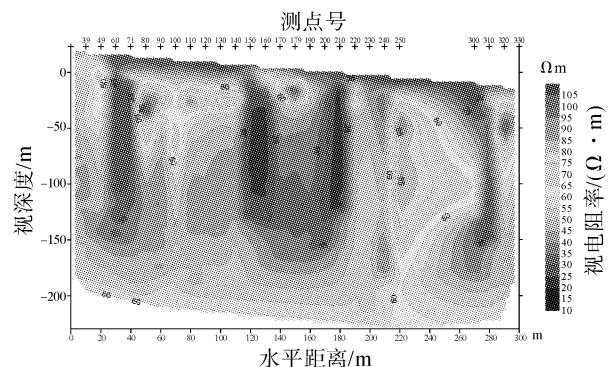


图 6 1 线视电阻率剖面图
Fig. 6 The apparent resistivity profile

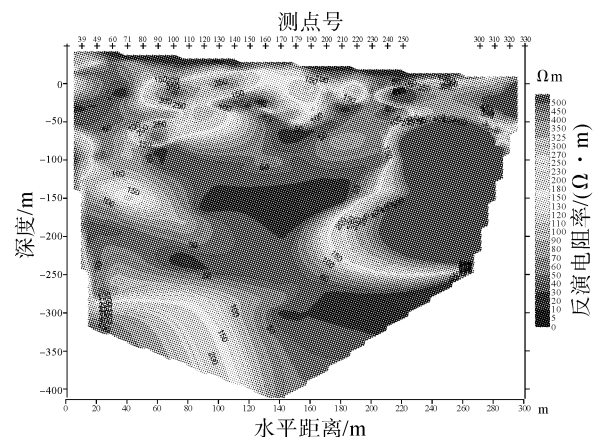


图 7 1 线一维反演电阻率剖面图
Fig. 7 One-dimensional inversion resistivity profile

6 结 论

瞬变电磁法小线框技术以其特有的重量轻、携带方便、对环境要求低等特点,适用于山区和城镇,且施工简单,野外采集速度快,加大电流使得抗干扰能力增强,横向分辨率提高,现场可快速定性分析。通过多年来的实践和应用,完善了瞬变电磁法小线框野外采集施工设计和数据处理方法及解释推断技术(探测隐伏断层的技术方法)。该技术可为金属矿产、水资源探测和铁路、公路、桥梁、隧道、输油管道的线路选择和基础勘查及地质灾害调查(采空、岩溶、塌陷)提供准确、简便的技术手段。从而使 TEM 技术的应用范围进一步扩大。

参考文献:

- [1] 牛之琏. 时间域电磁法原理[M]. 长沙:中南大学出版社,2007:11,74-75.
- [2] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探(中华人民共和国地质矿产部地质专报)[M]. 北京:地质出版社,1998:8,46-49.
- [3] 刘显耀,刘文. 多功能电磁勘探仪:中国,03262603.7 [P]. 2004-09-15.
- [4] 吴子泉,尹成. 电阻率横向剖面法及其在隐伏断层探测中的应用研究[J]. 地球物理学报,2007,50(2):625-631.
Wu Ziquan, Yin Cheng. Application of schlumberger transverse profiling method to detecting buried faults[J]. Chinese Journal of Geophysics,2007,50(2):625-631.
- [5] 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,2003,122(11):82-85.
Jin Dongchun, Cui Tianri. Applying geophysical methods for detecting buried faults[J]. World Geology,2003,122(11):82-85.
- [6] 年廷凯,谭周地,李广杰,等. 上海市隐伏断层及活动性研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2000,11(4):11-14.
Nian Tingkai, Tan Zhouidi, Li Guangjie, et al. Research on buried faults and its activity in Shanghai city[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2000,11(4):11-14.
- [7] 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):536-545.
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):536-545.
- [8] 龚巧玉. 北京北苑居住区第四系断层走向勘察[J]. 地质与勘探,1999,35(4):53-55.
Gong Qiaoyu. Reconnaissance of faults in quaternary in the Beiyuan residential area, Beijing[J]. Geology and Prospecting,1999,35(4):53-55.
- [9] 常旭,李林新,刘伊克,等. 北京断陷黄庄—高丽营断层伪随机可控震源地震剖面[J]. 地球物理学报,2008,51(5):1503-1510.
Chang Xu, Li Linxin, Liu Yike, et al. Seismic profile of Huangzhuang-Gaoliying fault in Beijing by mini-sosie method[J]. Chinese Journal of Geophysics,2008,51(5):1503-1510.
- [10] 冷元宝,王运生,王锐. 黄河河道整治工程水下基础探测试验研究[J]. 工程地球物理学报 2004,1(2):97-101.
Leng Yuanbao, Wang Yunsheng, Wang Rui. Research on detecting the underwater groundwork of Yellow River regulations[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2004,1(2):97-101.
- [11] 严从容. 沿江断裂在南京长江第四大桥的位置确定[J]. 地质学刊,2009,33(2):109-202.
Yan Congrong. Site orientation of fracture along river in fourth Nanjing Yangtze River Bridge[J]. Journal of Geology,2009,33(2):109-202.
- [12] 杨农合,王辉,徐小林,等. 应用瞬变电磁法小线框大电流探测隐伏断层[J]. 物探与化探,2011,35(1):80-85.
Yang Nonghe, Wang Hui, Xu Xiaolin, et al. The application of the high-current and small coil transient electromagnetic method (TEM) to the detection of concealed faults[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2011,35(1):80-85.
- [13] 杨农合,徐小林,吴朝俊,等. 应用瞬变电磁法小线框大电流探测水下构造[J]. 工程地球物理学报,2012,9(3):279-284.
Yang Nonghe, Xu Xiaolin, Wu Chaojun, et al. Application of high current and small coil transient electromagnetic method to detection of underwater structure[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2012,9(3):279-284.

(责任编辑 王卫勋)