

CSAMT 探测断层在北京新区规划中的应用

李帝铨, 底青云, 王光杰, 李英贤, 石昆法, 岳安平, 白大为

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要 为了给规划中的北京市某新区提供基础地质资料,需查明区内断裂的准确位置、产状以及覆盖层厚度.利用CSAMT方法进行了勘察工作,由于区内人文干扰和电磁干扰严重,野外施工时采用了多种手段以保证观测数据的可信度;数据处理时利用作者开发的基于遗传算法的CSAMT全资料反演程序对野外数据进行反演.分析反演结果并结合已知地质资料,给出了区内断裂的准确位置等信息,为新区规划提供了可靠的基础资料.

关键词 可控源音频大地电磁, 新区规划, 遗传算法, 全资料反演

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)06-1963-07

Fault detection by CSAMT and its application to new district planning in Beijing

LI Di-quan, DI Qing-yun, WANG Guang-jie, LI Ying-xian,
SHI Kun-fa, YUE An-ping, BAI Da-wei

(Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract In order to provide basic geological information for a new planning district in Beijing, it is necessary to identify the precise location of the faults, the thickness of the overburden, and estimate the activity of the faults. We used CSAMT method for survey work. As there was strong electromagnetic interference in the survey area, we took many means to ensure the data obtained credible. By employing genetic algorithms full data inversion program for data inverse, we achieved a good result. With comprehensive analysis of the geophysics and geological data, we have determined the precise locations of faults, and provided reliable information for the new district planning.

Keywords CSAMT, new district planning, genetic algorithm, full data inversion

0 引言

断裂与地震和地质灾害紧密相关,对城市和工程安全直接造成威胁.现代工程技术还无法抗拒地震带来的破坏,我们只能在城市建设的规划期,先将断裂的位置、产状、活动性等摸清,才能将地震带来的破坏降至最低^[1~4].

根据前人工作,规划中的北京市某新区内主要发育了两条断裂以及它们的次生断裂,由于工作程度不够,断裂的位置、产状、活动性等信息不清楚.为了更好的进行新区规划,我们在区内开展了地球物理勘探工作,要求在区内查明断裂的具体位置和产

状,覆盖层厚度,为新区规划提供基础地质资料.

测区被第四纪松散沉积物覆盖,断裂成为隐伏断裂,断裂两侧松散沉积介质物性差异较小,这使通过地球物理探测隐伏断裂的难度加大.测区虽然是规划中的新区,但区内人口比较密集,交通网络发达,高压输电线密布,地下地上管道、电缆和各种生命线工程密布,存在各种干扰噪音.在该区曾开展的一些地球物理勘探工作,由于电磁干扰和高频震动干扰太严重,没有取得令人满意的结果.

可控源音频大地电磁法^[12~14](Controlled source audio-frequency magnetotellurics, 简称为CSAMT)是一种频率域电磁测深方法.它用地面偶

收稿日期 2008-02-10; 修回日期 2008-04-28.

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-121),973;2006CB2002206 资助.

作者简介 李帝铨,男,1982年生,现为中国科学院地质与地球物理研究所研究生,主要从事浅层地球物理工作.
(E-mail: lidiquan@mail.iggcas.ac.cn)

极子或水平线圈作为人工信号源来产生可控的电磁波信号,通过接收不同频率的电磁波信号以达到测深的目的。

CSAMT 作为地球物理勘探方法中一种强有力的电磁法勘探手段,近年来,国内外 CSAMT 方法在矿山、地热、水资源,油气勘探中发挥了显著的作用。自从 20 世纪 80 年代引入我国,在勘探石油、天然气、地热、金属矿产、水文和环境工程、以及城市地质工作中发挥了重要的作用^[5~11]。尤其在一些有工业干扰的地区,由于采用人工源,仍可获得较大信噪比的电磁信号使该方法成为浅层地球物理勘探中强有力的工具之一,可在干扰较强的城市、城郊和地区开展工作;由于是比值测量,可减少外来随机干扰的影响;能较敏感的“捕捉”到断裂构造,并能较准确的控制断裂的位置,同时还可以展示出断裂的形态^[4~12]。

但正因为使用人工源,使得近场电磁波信号不是平面波,从而使得 CSAMT 的资料处理技术受到限制,不能直接应用已经发展比较成熟的大地电磁(magnetotellurics,缩写为 MT)资料处理技术。由于发展 CSAMT 资料处理的难度,至今大多数实际应用中的 CSAMT 资料处理方法一直停留在一维资料处理的阶段。

根据测区的情况以及工程项目要求,本次地球物理勘探工作采用 CSAMT 方法。

由于本次测线沿途有电网、变压器以及高速公路的存在,电磁干扰比较严重,所采集的数据比较混乱。利用传统的线性方法反演时,很难给出较好的初始模型,反演容易陷入局部极值,难以得到有效的反演结果。将我们开发的基于遗传算法的 CSAMT 全资料反演程序^[15,16]应用到本次数据处理,取得较好的效果。根据 CSAMT 反演断面图的电阻率异常,结合本区的地质情况进行了分析解释,给出了区内两条断裂的准确位置及其产状,以及覆盖层厚度,为新区规划提供有效的基础地质资料。

1 测区地质与地球物理概况

按构造单元划分,新区位于中朝准地台华北断坳大兴叠隆起东北部,北面以通县—南苑断裂与北京凹陷分界。

北京地区处于新华夏、阴山纬向和祁吕—贺兰山字型东翼三个构造体系的交汇部位。其中新华夏构造体系活动性强,控制着北京地区地质构造的基本格局、地貌基本形态和地震活动。第四纪以来,新

华夏构造体系仍在继续活动,是主要发震的地震构造体系。新区周边主体构造为西北通过的 NE 向的南苑—通县断裂和东南通过的 NE 向的夏垫—马坊断裂及其次生的礼贤—牛堡屯断裂。礼贤—牛堡屯断裂是北京南部平原地区的一条控制性断裂,是划分大兴叠隆起与固安—大厂叠凹陷的界线。该断裂在早第三纪时期活动较强烈,控制了大兴迭隆起南段东界。

测区地层岩性大致归纳为:覆盖层为人工堆积层、新近沉积层、第三系和第四系松散沉积层;基岩为白云岩、白云质灰岩等。

为了对本区的岩矿石的电性特征有个系统的了解,提供进行地质解释的依据,对本区采集的 13 块标本,在室内进行了标本电性测定。测定的主要电性参数是电阻率 ρ 。

表 1 给出标本测定结果。从表 1 可以看出:白云岩和白云质灰岩的电阻率高,大于 $1000 \Omega \cdot m$,第四系残、坡积物的电阻率低,电阻率值小于 $100 \Omega \cdot m$ 。由于无法采集到断层破碎带的岩石标本,标本中没能测到断层破碎带的电阻率,根据以往的经验,断层破碎带的电阻率也很低,电阻率值小于 $100 \Omega \cdot m$ 。CSAMT 法就是利用电阻率这一参数,表 1 的数据说明该方法能区分该区内的岩性和断层破碎带。

表 1 工作区岩石电性参数统计表
Table 1 Statistics of electrical parameters of the rock samples

岩石名称	标本块数	$\rho(\Omega \cdot m)$	
		均值	变化范围
白云岩	3	1086.3	557.9~1584.6
白云质灰岩	4	1381.5	463.0~1600.0
第四系残、坡积物	6	37.0	15.3~97.1

2 CSAMT 法原理

可控源音频大地电磁法基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组导出电场(E_x),磁场(H_y)与视电阻率(ρ_s)的关系式^[12~14]:

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2, \quad (1)$$

式中 f 代表频率。由(1)式可见,只要在地面上观测到两个正交的水平电磁场(E_x, H_y)就可获得地下的视电阻率 ρ_s ,也称卡尼亚电阻率。

又根据电磁波的趋肤效应理论,导出了趋肤深

度公式:

$$H \approx 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \quad (2)$$

式中 H 代表探测深度, ρ 代表地表电阻率, f 代表频率.

从(2)式可见,当电阻率固定时,电磁波的传播深度(或探测深度)与频率成反比.高频时,探测深度浅,低频时,探测深度深.人们可以通过改变发射频率来改变探测深度,从而达到变频测深的目的.

CSAMT 法具有一些特点:使用可控制的人工场源,信号强度比天然场要大得多,因此可在干扰较强的城市、城郊和地区开展工作;由于是比值测量,因此可减少外来的随机干扰,并减少地形的影响;基于电磁波的趋肤深度原理,利用改变频率进行不同深度的电测深,大大提高了工作效率;横向分辨率高,可灵敏地发现断裂,能较敏感的“捕捉”到断裂构造,并能较准确的控制断裂的位置,同时还可以展示出断裂的形态;由于接收机在接收电场的同时还要接收磁场,因此高阻屏蔽作用小,可穿透高阻层.同时也存在一些缺点,比如静态效应(地表电性不均匀会影响到深部的测量结果)等.

3 CSAMT 数据采集

3.1 采用的仪器设备

工作中我们采用的仪器是加拿大 PHOENIX 公司生产的 V6-A 多功能电法仪,频率选择 9600~1 Hz,采用自动采集 4F30 系列,共计 54 个频点,最高频率 9600 Hz,最低频率 1 Hz.发射机为加拿大 PHOENIX 公司 T15 型 15 kW 发射机.发电机采用 30 kW 发电机,最大电流 30 A.该仪器系统探测深度大、观测精度高,并具有自检功能.

3.2 测线布置

我们根据区域地质资料以及前人工作,在区内布置了两条平行的测线,分别是北线和南线,测线方位都是正东.北线长 4640 m,点距 40 m;南线长 4360 m,点距 40 m;两测线距离约为 3000 m.

3.3 参数选择

CSAMT 法在开展大面积工作之前,进行方法试验和参数选择是必要的,尤其是对发射和接收的频率以及对发射与接收距离 R 进行选择^[12~14].在本区考虑到探测目标较深,尽量利用中低频段,所以选择的频率为 $2^{13} \sim 2^0$ Hz.此频段可实现从地表探测到地下 1500 m 的深度.CSAMT 法的探测深度既受频率的控制又受收发距 R 的限制,这里选取 R 距为 8000 m, AB 长 1500 m,从地表到地下 1000 m 的

深度范围内保证探测结果可靠.

3.4 提高观测数据质量的措施

为了接收到可靠的信号,电场测量采用不极化电极.在每次观测之前,都要测量接地电阻,保证接地电阻小于 2 k Ω ,在困难条件下不大于 10 k Ω .不极化电极的极差小于 2 mV,以获得较强的电场信号和较高的信噪比.对于磁探头的埋设,我们克服各种困难,使其与供电电极 AB 方向垂直,并保证其水平放置;同时,将其埋实,以避免环境干扰.

本次测线沿途存在多处高压电网以及民用电网,在某些地段还存在通讯电缆.

高压电网的电磁场强度很大,而且由高压电网辐射出的 50 Hz 电磁波在地下传播时,出现频散现象,给我们测量的干扰不仅仅限于 50 Hz 及其谐波.同时,由于高压电网的负载是变化的,会产生脉冲信号,具有非常宽的频谱.因此高压电网的干扰频率范围是非常宽的,虽然仪器本身设置了 50 Hz 陷波,但效果不明显.

经过前人工作和我们的试验,发现虽然高压电网的影响很严重,但它的影响范围不是很大,并且它的影响与距离的平方成反比.试验表明,对于民用电网,只要测点偏离电线的垂直距离大于 30 m,其影响就会明显减小.对于数万伏的高压电网,测点偏离电线的垂直距离大于 100 m 时,其影响也会明显减小.

通讯电缆的影响有时比高压电网的影响还要严重些.虽然高压电网的干扰频率范围很宽,但它的强干扰频率是固定的,可通过滤波等技术进行处理,而通讯电缆的频带很宽,很难进行识别和消除.据我们试验的情况,离开通讯电缆的最小距离应大于 50 m.

一些场地及道路表面采用钢筋混凝土结构,苗圃、菜地多采用金属大棚,这些都相当于金属网.金属网由于分布密集,面积大,对电磁信号形成屏蔽或扭曲,在这些地方一般很难观测到正常信号.测量时也应该尽量远离.

4 数据处理与资料解释

4.1 数据预处理

在获得了可信的原始数据后,我们首先对资料进行预处理.由于本次工作虽然采用了种种避开干扰的方法,但还是受到比较严重的电磁干扰,数据出现极点,因此我们的数据预处理主要是去噪和静态校正.

由于我们采用全资料反演方法,故我们不用进行传统的近场改正.

对于去噪,我们试验了五点三次、五点二次平滑

以及三点、五点汉宁窗滤波等方法,经过对比,发现采用五点二次平滑在忠于原始曲线趋势的情况下能最大限度的平滑飞点,取得较好的效果;对于静态校正,采用汉宁窗滤波方法能取得比较好的效果,本次采用如下所示的滤波器:

$$H(\alpha) = \begin{cases} (1 + \cos 2\pi\alpha/\omega)/\omega, & |\alpha| \leq \omega/2, \\ 0, & |\alpha| > \omega/2, \end{cases} \quad (3)$$

其中 ω 为滤波窗口的宽度.实际计算时,将 $H(\alpha)$ 离散成 7 点滤波器.

4.2 数据反演

总体来说,CSAMT 数据反演方法分线性和非线性两大类.其中,线性方法是用得很多,非线性方法则少见发表^[15,16,20~25].

在线性算法里面,传统上 CSAMT 的资料处理一直采用两类方法;其一是不用近场及过渡区场的资料,只取远场数据进行反演^[16,17],从而造成较大的资料浪费;其二是做近场校正,将 CSAMT 资料校正成 MT 资料后,再用 MT 的方法来反演^[17],但是,现有的近场校正方法都是建立在均匀半空间基础上,当地下介质不均匀时,近场校正的应用效果不理想^[18].而且近场校正仅能校正非波区场效应造成的卡尼亚视电阻率的畸变,并不能将双极源场的近区和过渡区数据校正为相应地电条件下的波区(平面波)场的测量结果^[16].

近年来国内外一些地球物理学家开始寻求不考虑近场校正的全场资料的数值模拟和反演方法^[13~16],我们也进行了这方面的探索,并开发成功基于遗传算法的 CSAMT 全资料反演程序^[15].

总的来说,线性反演方法具有简单、运算速度快的优点,但同时也具有比较依赖于初始模型,容易陷入局部最优解的缺点.线性反演问题的目标函数只有一个极值,非线性反演问题存在多个极值.多极值的存在使线性化求解非线性反演问题时,若初始模型选择不当会陷入局部极值,得到错误的解^[18].

我们开发的基于遗传算法的 CSAMT 全场资料反演程序,具有对初始模型的依赖小,不易陷入局部极值,抗干扰能力强的优点.

我们将基于遗传算法的 CSAMT 全场资料反演程序应用到本次数据处理.

4.3 资料解释

图 1、图 2 是剖面综合解释图,图中横轴为测点位置,纵轴为探测深度,电阻率从小到大的变化用黑到白的颜色变化规律表示.

北线:

北线综合解释结果如图 1 所示.从 CSAMT 反演剖面的电性特征来看,该测线的浅部为低阻层,大体由西向东厚度略增大,由 400 m 左右增至约 600 余米.这一层以电性结构判定为新生界砂泥质沉积层;该层上下电性细分层不明显.至于 10000~11400 间出现的浅部局部高阻,是由于该段测线布置在乡村马路上,来往车辆以及路边民用电网对高频信号的干扰造成的.

第二层为高阻中高阻层,电阻率 200~500 $\Omega \cdot m$,这一层以电性分析有如下特点,横向变化较大,零乱.推断应和本区内下古生界灰岩泥灰岩中薄层组合.

在本区,我们推断断裂的依据为,断裂破碎带水显低阻,横向地层的明显间断变化.从剖面看来,11200 附近和 13360 以及 14100 三处有明显的断裂显示,分别定为 F1、F2、F3,断层较陡.

南线:

该段有 1000 m 左右的测线在公路边上,中间还穿过高速公路,经过村庄,干扰比较严重,电阻率变化较乱,但仍可显示和北线相当的电性分层结构.

南线综合解释结果如图 2 所示.从 CSAMT 反演剖面来看,浅部为低阻层,由西向东厚度渐变大,较北线明显,厚度由 400 m 变至 800 m.这一层以电性结构判定为新生界砂泥质沉积层.至于 10000~11960 间出现的浅部局部高阻,也是由于该段测线布置在乡村马路上,来往车辆以及路边民用电网对高频信号的干扰造成的.

从剖面看来,10800 和 13400 两点电性明显变化,分别记为 F1、F2,解释为断层.

结合地质资料分析,北线的 F1 和南线的 F1 应是同一断层;同样,北线的 F2 和南线的 F2 也为同一断层;由于南线的没有出现和 F3 对应的断裂构造,推断北线的 F3 是 F2 的次生断裂, F3 的性质与 F1、F2 不同,如果要准确判断 F3 的性质,建议开展进一步的工作.从 CSAMT 探测结果看 F2 对新生界沉积厚度影响较 F1 明显,故 F2 较 F1 新生界以来的活动性强.由于只进行了 CSAMT 探测,故无法对这几条断裂的地震活动性进行评价.

5 结论

(1)在其它地球物理勘探方法难以取得效果的强干扰地区开展 CSAMT 探测,可以取得较好的效果.

(2)野外施工时,应尽量避免电网、通讯电缆以及金属网等,如无法避开,也要尽量远离,保证采集

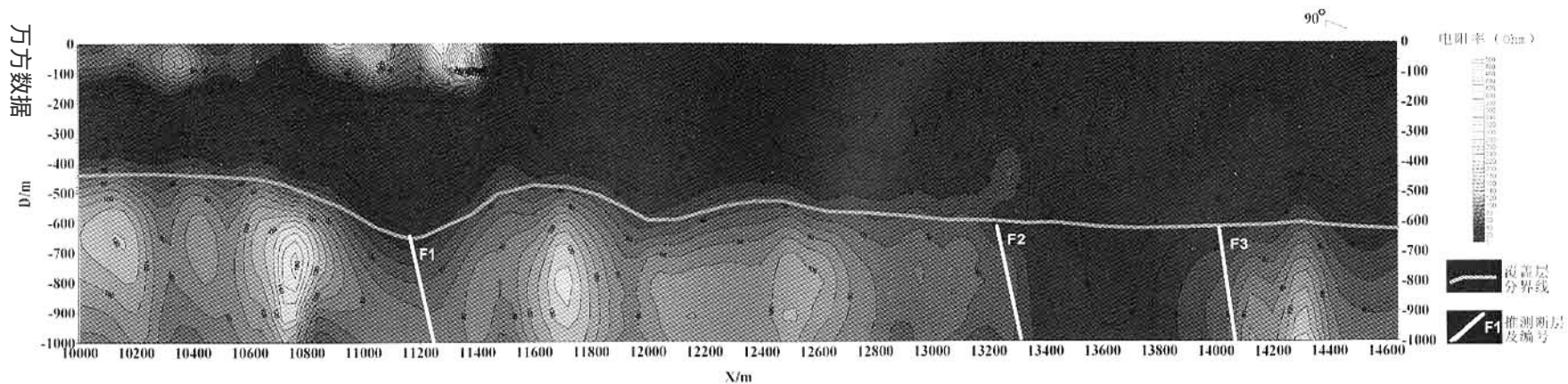


图1 CSAMT反演电阻率断面图(南线)

Fig. 1 The resistivity profile from CSAMT inversion (The south line)

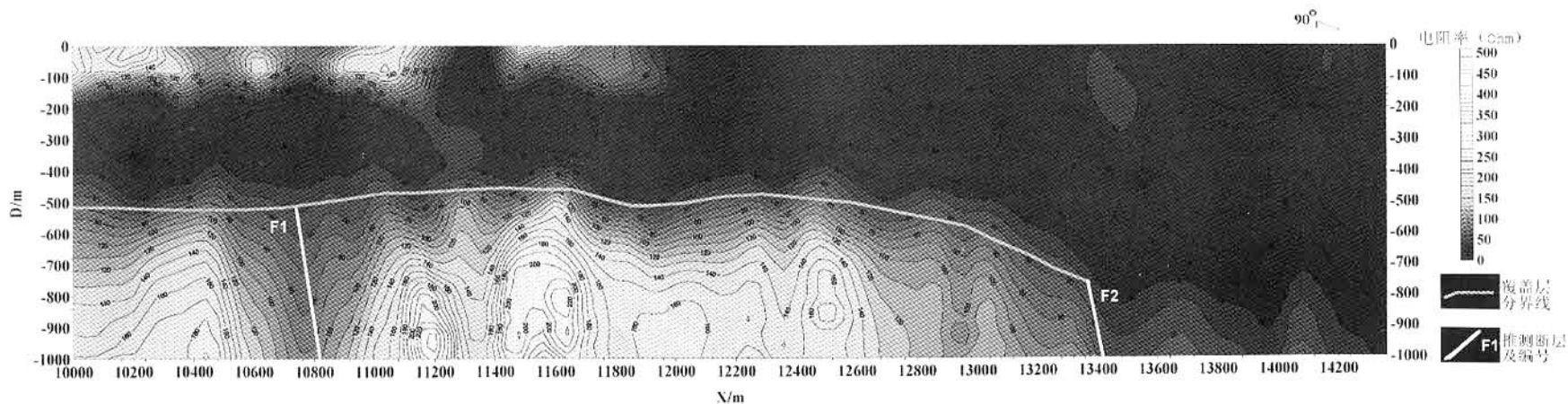


图2 CSAMT反演电阻率断面图(北线)

Fig. 2 Same as Fig. 1 but for the north line

数据的可信。

(3)由于干扰的存在,数据预处理是有必要的。采用基于遗传算法的CSAMT全场资料反演程序进行数据反演,不但具有对初始值依赖小、抗干扰能力强的特点,而且不用进行近场校正,能最大限度的利用数据。并能够定量反映地下电性参数,给地质解释带来更大的实用价值。相对于线性或局部线性算法,遗传算法的效率要低,但就目前的计算机发展水平,这样的代价是值得的。

(4)经过本次工作,准确的定位了区内断裂的位置、产状及其覆盖层厚度。由于只是进行了CSAMT探测工作,不能进一步的判断断裂的活动性,建议开展更深入的工作。

参 考 文 献 (References):

- [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.
Deng Q D, Xu X W, Zhang X K, *et al.* Methods and techniques for surveying and prospecting active faults in urban areas[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing) (in Chinese), 2003, 10(1): 93~104.
- [2] 易兵,曾昭发,李恩泽,等. 电法探测城市活断层的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(sup): 115~118.
Yi B, Zeng Z F, Li E Z, *et al.* The survey and research for a live fault in city by electrical prospecting[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edit ion) (in Chinese), 2005, 35(sup): 115~118.
- [3] 徐明才,高景华,刘建勋,等. 应用于城市活断层调查的地震方法技术[J]. 中国地震, 2005, 21(1): 17~23.
Xu M C, Gao J H, Liu J X, *et al.* Application of the seismic method to detecting active faults[J]. Earthquake Research in China (in Chinese), 2005, 21(1): 17~23.
- [4] 吴子泉,刘元生,刘保金,等. 地球物理方法在城市地震活动断层精确定位中的应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 528~533.
Wu Z Q, Liu Y S, Liu B J, *et al.* Application of geophysical method to the precise positioning of urban seismic mobile moving fault [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(2): 528~533.
- [5] 吴璐萍,石昆法. 可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39(5): 712~717
Wu L P, Shi K F. Application of CSAMT to the search for ground water[J]. Chinese J. Geophys (in Chinese), 1996, 39(5): 712~717
- [6] 徐世浙,刘斌. 电导率分层连续变化的水平层的大地电磁正演[J]. 地球物理学报, 1995, 38(3): 262~268.
Xu S Z, Liu B. A numerical method for calculation MT field on a layer model with continuous change of conductivity in each layer[J]. Chinese J. Geophys (in Chinese), 1995, 38(3): 262~268.
- [7] 底青云,王妙月,石昆法,等. 高分辨率 V6 系统在矿山顶板涌水隐患中的应用研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(5): 1~5
Di Q Y, Wang M Y, Shi K F, *et al.* An applied study on prevention of water bursting disaster in mines with the high resolution V6 system[J]. Chinese J. Geophys(in Chinese), 2002, 45(5): 1~5
- [8] 底青云,石昆法,王妙月,等. CSAMT 法和高密度电法探测地下水资源[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(3): 53~54.
Di Q Y, Shi K F, Wang M Y, *et al.* Water resources exploration with CSAMT and high density electric resistivity method [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2001, 16(3): 53~54
- [9] 底青云,王妙月,石昆法,等. V6 多功能系统及其在 CSAMT 勘查应用中的效果[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(4): 663~670.
Di Q Y, Wang M Y, Shi K F, *et al.* Multifunction system-V6 and its effectiveness in CSAMT exploration[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2002, 17(4): 663~670.
- [10] 刘延忠,冯辉. 在城市地质工作中应重视一种新型电磁法—可控源音频大地电磁法的应用[J]. 城市地质, 2006, 1(1): 41~48.
Liu T Z, Feng H. A new electromagnetic method in urban geological work—the application of the CSAMT[J]. City Geology (in Chinese), 2006, 1(1): 41~48.
- [11] 谭儒蛟,胡瑞林,徐文杰,等. 金沙江龙蟠变形体隐伏构造 CSAMT 探测与解释[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 283~288.
Tan R J, Hu R L, XU W J, *et al.* CSAMT exploration and geological interpretation of perdue tectonic structures of Longpan deformation slope in Jinsha River [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(1): 283~288.
- [12] 何继善. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1990.
He J S. Control source audio-frequency magnetotelluric[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1990.
- [13] 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 1999.
Shi K F. Theory and application of CSAMT method[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [14] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京:地质出版社, 1990.
Piao H R. The principle of electromagnetic sounding[M]. Beijing: Geological Press, 1990.
- [15] 王光杰,王勇,李帝铨,等. 基于遗传算法 CSAMT 反演计算研究[J]. 地球物理学进展, 2006, 24(4): 1285~1289.
Wang G J, Wang Y, Li D Q, *et al.* The application of genetic algorithm to CSAMT inversion[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 24(4): 1285~1289.
- [16] 王若,王秒月. 一维全资料 CSAMT 反演[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(1): 107~114.
Wang R, Wang M Y. Inversion of 1-D full CSAMT data[J]. Oil Geophysical Prospecting(in Chinese), 2007, 42(1): 107~114.

- [17] 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 Z Q, Yin C. Application of schlumberger transverse profiling method to detecting buried faults[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(2):625~631.
- [18] 吴子泉,谭捍东,王威虎. 电阻率横向剖面法在倾斜断层精确探测中的应用研究[J]. 地球物理学进展,2006,21(4):1296~1301.
Wu Z Q, Tan H D, Wang C H. Application of electric resistivity transverse profiling method to detect oblique faults precisely[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(4): 1296~1301.
- [19] 白登海,王立凤,孙洁,等. 城市活断层探测中电磁噪音和环境干扰对浅层电磁方法的影响[J]. 地震地质,2002,24(4):549~556.
Bai D H, Wang L F, Sun J. Effects of urban noise on electromagnetic methods[J]. Seismology and Geology (in Chinese), 2002, 24(4):549~556.
- [20] Yutaka Sasaki, Yoshihiro Yoneda, *et al.* Resistivity imaging of controlled source audio frequency magnetotelluric data[J]. Geophysics, 1992, (7) :952~955.
- [21] Wannamaker P. Tensor CSAMT survey over the sulphur springs thermal area. Valles Caldera, New Mexico, U. S. A., Part I : Implications for structure of the western caldera[J]. Geophysics, 1997, (2) :451~465.
- [22] 罗延钟,周玉水,万乐. 一种新的 CSAMT 资料近场校正方法[M]. 勘查地球物理勘查地球化学文集第 20 集. 北京:地质出版社,1996.
Luo Y Z, Zhou Y B, Wan L. A new method for the near-field correction of CSAMT[M]. The corpus of explorations geophysics and geochemistry (the 20th). Beijing: Geological Press, 1996.
- [23] 冯思臣,王绪本,阮帅. 一维大地电磁测深几种反演算法的比较研究[M]. 石油地球物理勘探,2004,39(5):594~599.
Feng S C, Wang X B, Ruan S. Comparison among several inversion algorithms of 1D MT[M]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 2004, 39(5):594~599.
- [24] 刘云峰,曹春蕾. 一维大地电磁测深的遗传算法反演[J]. 浙江大学学报,1997,31(3):300~304.
Liu Y F, Cao C L. Inversion of one-dimensional MT data using genetic algorithms[J]. Journal of Zhejiang University (in Chinese), 1997, 31(3):300~304.
- [25] 师学明,王家映,张胜业,等. 多尺度逐次逼近遗传算法反演大地电磁资料[J]. 地球物理学报,2000,43(1):122~130.
Shi X M, Wang J Y, Zhang S Y, *et al.* Multiscale genetic algorithm and its application in magnetotelluric sounding data inversion[J]. Chinese J. Geophys (in Chinese), 2000, 43 (1): 122~130.