

基于 CSAMT 法的地基基础评价

程辉, 李帝铨, 底青云, 付长民, 王若

(中国科学院 地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室, 北京, 100029)

摘 要: 针对规划中的唐山市中心高层建筑工区内存在采空塌陷、岩溶塌陷和隐伏构造及地裂缝等不良地质隐患, 对地基基础及上层建筑物构成安全威胁等问题, 为了给后续施工提供基础地质资料, 查明场区内的不良地质, 采用 CSAMT 进行探测, 并采用多种数据处理办法, 多测线比较, 获取场区内可靠的三维电阻率。通过研究断面图和不同深度的水平切片图的电性分布, 对场区的地基进行合理划分与评价。研究表明: 采用 CSAMT 探测结果能区分多种不同类型的不良地质结构与构造, 并可合理布置钻探位置。

关键词: CSAMT; 地基评价; 强干扰

中图分类号: P631.3251

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2010)04-1561-08

Foundation evaluation based on CSAMT method

CHENG Hui, LI Di-quan, DI Qing-yun, FU Chang-min, WANG Ruo

(Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the fact that the high-rise buildings are planning to be built in the center of Tangshan city, which is in the overall reconstruction planning of the city, there is a risk area to build high-rise buildings, gob collapse, karsts collapse, buried structural fracture zone and ground fissures in this area, which would be the disadvantageous factors for the construction of the high-rise buildings, the foundation evaluation with controlled source audio-frequency magnetotelluric method (CSAMT) was executed to find out the potential weak geological structure. Reliable 3D resistivity sets were gotten in the investigated area. The electric distribution of different profiles and horizontal slices in different depths were studied, and the district was obtained and confirmed by drilling information. The results show that the CSAMT detection results can be used to distinguish different types of adverse geologic structure and tectonics, and to arrange the drilling location rationally.

Key words: CSAMT; foundation evaluation; strong interference

在工程中, 应用地球物理方法进行勘查的目的是要确定影响工程安全的地质体的埋深、规模、形态及其展布形态^[1]。拟建的 100 m 高层建筑位于唐山市中心, 由于存在破坏地质环境的人类采矿活动和区内发育的岩溶塌陷和陷伏构造地裂缝, 对地上建筑物安全形成潜在危害; 为了高层建筑群的整体安全, 在考虑建筑物地基基础安全的同时, 还要考虑地基基础以下

的深部地质构造特征对地上建筑群潜在的危害造成的影响, 选择地球物理方法进行勘探, 勘探的深度达 500 m 左右。在城市中心开展勘查工作时, 干扰按来源可以分为^[2-6]: (1) 在电磁干扰, 即高压输电网、开关电源的闭合、各种通讯设备、电气化铁路等造成的宽域冲击信号; (2) 震动干扰, 即运动中载重汽车和运行中火车造成的震动; (3) 地质噪声, 这是浅地表

收稿日期: 2010-01-10; 修回日期: 2010-03-25

基金项目: 中国科学院知识创新工作重要方向性项目(KZCX2-YW-121)

通信作者: 程辉(1976-), 男, 湖南津市人, 博士研究生, 从事电磁法研究; 电话: 13810273295; E-mail: chenghui@mail.iggcas.ac.cn

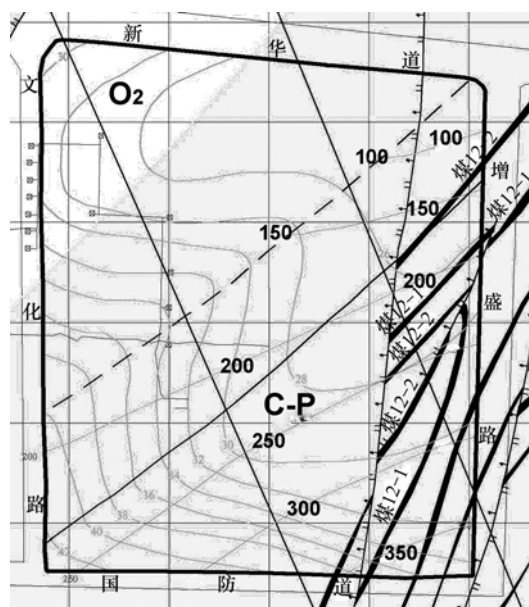
经反复平整、回填、硬化造成的局部地质不均匀体所致。在以往勘查工作中,选用的方法可以分为浅层地震法、常规电法和电磁法。在城市中心开展勘查工作时,以波速度为理论依据的勘查方法会遇到由于繁忙的交通造成的波场干扰,特别是载重汽车与火车在运行过程中产生的能量巨大的震动,而无法采集到反映地下介质信息的数据;常规电法是通过改变几何尺寸来达到探测不同深度地质体的目的,但在地处闹市中心进行的探测时无法提供实施的空间,同时,各种电气设备的接地极造成的干扰也不容忽视的;在利用电磁法开展工作时,由所选设备不同按场源细分又可以分为天然场源和可控源 2 种。利用天然场源在城市中心开展勘查工作时,人类活动造成电磁干扰信号强度远远大于微弱的天然场源信号强度,无法得到可靠和可信的数据^[7-9]。目前,可控源大地电磁法(Control source audio-frequency magnetotelluric method, 简称 CSAMT)不失为一种较好的勘探方法。

1 地区区域地质概况

场区内大地构造位于燕山台褶带南缘的开滦台凹。该台凹主要由中元古界至上古生界组成,晚古生界石炭、二叠系沉积环境稳定,发育齐全,沉积层厚度为 1.2 km 的煤系地层。中生代燕山运动强烈,形成一系列褶皱和断裂,并缺失中生界,也无岩浆运动。褶皱具隔挡式特点,背斜窄,走向断层发育,向斜宽。褶皱轴走向均为北东,主要有丰台背斜、车轴山向斜、碑子院背斜、开平向斜。自新生代以来,南北构造分异明显,南部下沉,上新统一第四系向北层层超覆,并伴随断裂活动形成鸦鸿桥凹陷、新军屯—唐山凸起、唐山东断凹等构造。

唐山市区褶皱构造由东向西为开平向斜和碑子院背斜。其中开平向斜规模最大,总体轴向为北东 40°,自开平向东转成近东西方向,构成 1 条向北西方向凸出的弧形弯曲,长约 50 km,宽 15~20 km,两翼不对称,西北翼构造复杂,岩层倾角较大,局部直立或倒转,并发育若干次一级构造。东南翼构造简单,岩层平缓,次级构造稀疏。

场区位置及地质图如图 1 所示。勘探区内(图 1 中矩形区域)及其周围断裂以北东—北东东向为主,其次为北西向和北东—近东西向。主体断裂为北北东—北东向的唐山断裂带。据现有资料,通过勘察区的断裂为唐山断裂带的唐山—丰南断裂带(F7-1, F7-2 和 F7-3),为晚更新世活动断裂,呈北北东—北东向分布,



C-P 为石炭系; O₂ 为奥陶系

图 1 场区位置及地质图

Fig.1 Location and geological map of work area

即开滦矿命名的唐山矿, 和 号断层, 断错上更新世底面, 上断点埋深为 30~60 m。场区内上覆第四系覆盖层, 下底为石炭系和二叠系的煤系地层。场区的西北区域第四系直接覆盖在奥陶系上, 同时, 在东部特别是东南区域发现的煤田, F 断裂从南到北几乎穿越场区。

2 CSAMT 原理

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是通过分析地面或井中观测到的由人工可控制的电磁波信号在地球介质中激发的电磁波场来达到勘探地球内部导电性结构的目的^[8-9]。工作频率一般从 10 kHz 到 0.125 Hz, 因此, 勘探深度一般从地表至地下 1.5 km。由于该方法采用 1 个强大的人工信号源, 它能压制干扰, 能采集到高质量的数据, 因此, 自 20 世纪 70 年代中叶起, CSAMT 就成了地球物理勘探方法中一种强有力的非地震勘探手段, 除成功地用于金属矿、石油、地热资源、地下水等勘探外, 近年来, 在岩溶、煤田采空区治理、深埋长隧道等工程地质和环境调查中发挥了重要的作用^[10-16]。

CSAMT 的基本理论是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)的关系式为:

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

式中: f 为频率。由式可见:只要在地面上观测到 2 个正交的水平电磁场(E_x 和 H_y)就可获得观测点的视电阻率即卡尼亚电阻率 ρ_s 。对观测的视电阻率进行反演就可获得探测深度范围内的电性结构。

根据电磁波的趋肤效应理论,可导出趋肤深度公式:

$$H \approx 356 \sqrt{\frac{\rho_s}{f}}$$

式中: H 为探测深度。从式可见:当电阻率 ρ_s 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,探测深度小;低频时,探测深度大。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 的主要优势在于:(1) 使用可控制的人工场源,信号强度比天然场要大得多,因此,可以在强干扰的城市内开展工作;(2) 由于是比值测量,可减少外来的随机干扰,并减少地形的影响;(3) 基于电磁波的趋肤深度原理,利用改变频率而不是几何尺寸进行不同深度的电测深,提高了工作效率;(4) 横向分辨率高,可灵敏地识别构造和目的层;(5) 由于在接收电场的同时还接收磁场,因此,高阻屏蔽作用小,可穿透高阻层^[10-12, 14]。

CSAMT 是以地下介质导电性差异产生的不同电阻率为基础。煤系地层一般是砂岩、泥岩互层。第四系松散层电阻率一般较低,为 $40 \Omega \cdot m$ 左右;泥岩电阻率也很低,一般为 $20 \sim 30 \Omega \cdot m$;砂岩电阻率较高,但含水后电阻率降低,破碎含水后电阻率会更低;致密灰岩电阻率一般很高,甚至达到 $1 k\Omega \cdot m$,存在岩溶或破碎含水后,电阻率降低。本次探测的目的是查清从地表至 $300 m$ 深度范围内的不良地质体,因而,需要关注低电阻率异常。而本区的不良地质体由于破碎和岩溶,电阻率都较低,因此,具有良好的 CSAMT 工作前提。

3 数据处理

根据以往工作中测得的电磁法(MT)或音频电磁法(AMT)电磁信号分析,电场振幅最低为 $0.01 mV/km$ 。对于如此微弱的信号,即使在一般的干扰背景上,都会使得电磁信号淹没在噪声之中。而对踏勘

时试采的天然场信号强度进行分析,天然电场振幅最低为 $0.22 mV/km$,因此,如果对数据不经过有效处理,那么,无法得出合理的结论,甚至可能得出错误的结果。

室内数据处理的过程是:(1) 对这些数据进行编辑处理,对照野外记录观察原始曲线形态,判断并剔除飞点、跳点,圆滑曲线,压制噪声,在此基础上初步给出原始电阻率断面图;(2) 结合地形、地质资料评估静态、地形的影响程度,并对初步处理后的数据进行静态校正,并进行反演计算;(3) 用计算得到的反演结果和原始曲线进行拟合分析,根据拟合差判断前期处理结果的合理性,若拟合误差较大,则说明数据处理存在问题,要重新进行校正与处理,直到反演结果与原始曲线拟合差达到反演结果合理要求为止。在处理数据时,同时根据场区的地质资料分析各测深点的视电阻率-频率曲线,主要是研究地下介质的岩性变化在测深曲线的表现形态^[17-19]。其处理流程如图 2 所示。

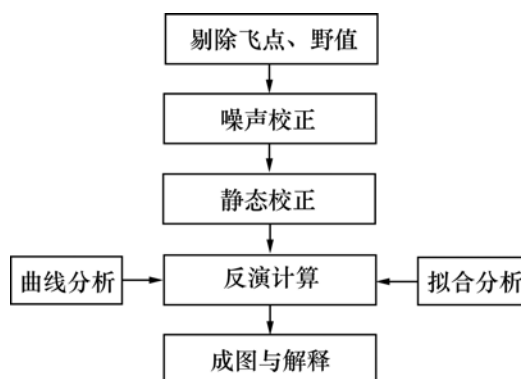


图 2 数据处理流程图

Fig.2 Sketch of data processes

工作中虽然采用了种种措施压制干扰,但数据还是受到比较严重的电磁干扰和静态效应的影响,原始数据出现飞点和野值,因此,进行数据预处理的目的主要是去噪和静态校正。

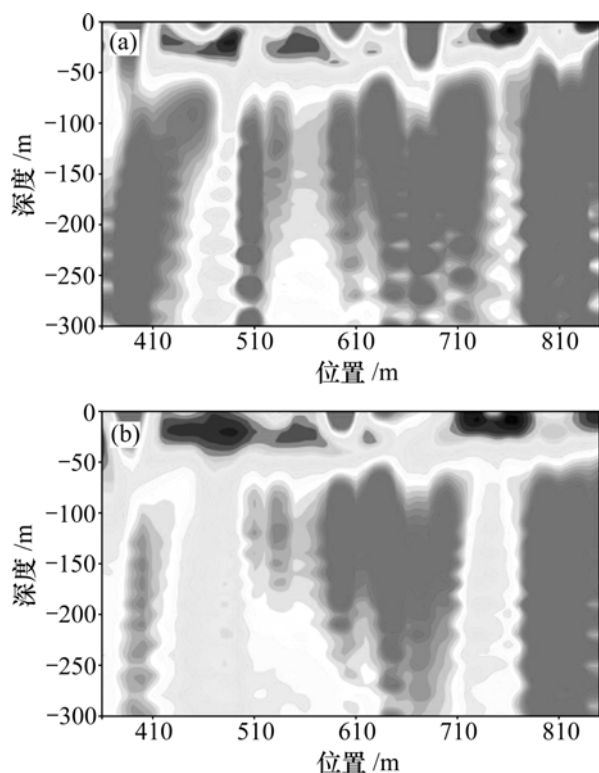
噪声去除时,采用五点三次、五点二次平滑以及三点、五点汉宁窗滤波等方法,经过对比,发现采用五点二次平滑在忠实于原始曲线趋势的情况下能最大限度地平滑飞点,取得较好的效果;同时,在区域局部范围内,测点密度大,这样,就可以考虑相邻测点的全频段数据在没有地质异常的情况下有一定的连续性,由此,可以先假设背景频率、视电阻率,然后,将测区的每个测点数据与频率、视电阻率进行比较,判别各条曲线不连续是受静态效应影响所致还是地下

确有异常体所致,分析所受静态位移影响的原因和受影响的程度,通过对受静态效应影响的整条曲线进行平移归位的方法来进行校正。这种曲线平移法可以很好地消除静态偏移,但平移效果在很大程度上取决于处理人员对数据的认知水平,对静态效应的判断和处理经验起关键作用,容易误将那些并非静态效应引起的异常当作静态效应被“校正”了。为了防止这种情况发生,还采用汉宁窗滤波方法进行静态校正。本文采用如下滤波器进行静态校正:

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

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

针对本区工作环境和地质条件复杂且地表电性不均匀的实际情况,综合分析地下介质电导率,同时采用五点二次滤波去噪、曲线平移和设置汉宁窗滤波法进行静态校正,将三者结合取得较好的校正效果,真实地反映了地下的地电情况。图3所示为CSAMT电阻率原始数据直接反演结果与校正后的反演结果。



(a) CSAMT 原始数据反演图; (b) 数据校正后反演图
图3 场区 CSAMT NS320 线原始数据与校正数据反演结果对比图

Fig.3 Comparison of before and after processing

4 反演电阻率剖面及地基评价

根据趋肤深度的计算公式,由 CSAMT 所获取的浅地表信息具有固有的弱点。为了全面了解场区的地电信息,在场区内还布置了 22 条高密度测线,重点了解浅地表的地电信息,其布置图与 CSAMT 的布置图相近。由此,获取了场区内大量的由浅部至深部的地电断面信息,经过前期预处理和最后的反演计算,结合当地的地质资料与信息,反复对比各种测线的反演结果,综合分析、去伪存真,最后,形成整个区域内的综合结果:CSAMT 法和高密度法反演结果整体反映了整个区域 300 m 以内浅的地质结构,地表以下 20~50 m 的电阻率为几十 $\Omega\cdot\text{m}$,为第四纪覆盖层;下部根据地层岩性和裂隙、构造破碎带以及含水情况差异,测得的电阻率具有明显的差异。利用地层电阻率的差异特征,结合地质资料综合解译得出浅部岩溶发育区、煤系地层区、构造带的位置和范围。

4.1 场区 CSAMT 数据反演结果

选择比较典型的 NS320 线和 NS520 线进行分析。NS320 线的 CSAMT 反演成果解释结果见图 4, NS520 线的 CSAMT 反演成果解释结果见图 5。

从图 4 所示的电性分布可以看出:场区南北方向覆盖层厚度差异较大,由北向南呈增厚趋势,变化范围为 20~50 m。反映在电阻率断面图上即地表以下 20~50 m 电阻率较低,为 40 $\Omega\cdot\text{m}$ 左右,解释为第四纪覆盖层,与场区详勘钻孔揭露覆盖层厚度较吻合,如图 4 中的黑实线所示。根据已有基础地质资料,场区内存在地层分界,NS320 线的电阻率断面图上也较好地反映了该地层分界,图中右侧虚线表示场区地层分界线,以北区域覆盖层下为奥陶纪灰岩,以南区域覆盖层下为石炭、二叠纪砂岩、泥岩等地层;场区西北角第四系覆盖层下部基岩为奥陶纪灰岩,缺失石炭、二叠纪地层,灰岩经风化、地下水的长期作用,浅部的小规模溶洞、溶蚀裂隙破碎带较发育,见图 4 中实线圈定区域。

从图 5 所示的电性分布可以看出:场区南北方向覆盖层厚度差异不大,呈中间薄、南北变厚的趋势,变化范围为 20~50 m,反映在电阻率断面图上为:地表以下 20~50 m 电阻率较低,为 40 $\Omega\cdot\text{m}$ 左右,解释为第四纪覆盖层,与场区详勘钻孔揭露覆盖层厚度较吻合,如图 5 中的实线所示。第四系覆盖层下的区域分为 2 个部分:在点号位置为 400~500 m,深度为 70~300 m 的范围内出现大面积低阻异常,推测为煤系

地层或含水破碎引起的低阻异常;点号位置为500~830 m所在区域为大范围的高阻区域,推测为奥陶纪灰岩,且非常完整。

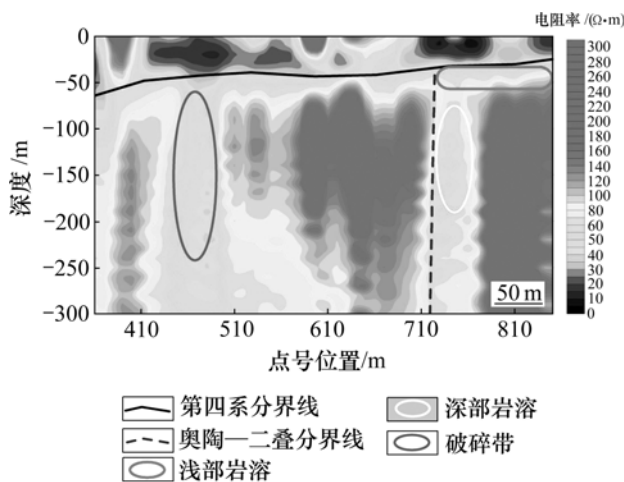


图4 NS320剖面CSAMT反演图

Fig.4 CSAMT inversed resistivity section of line NS320

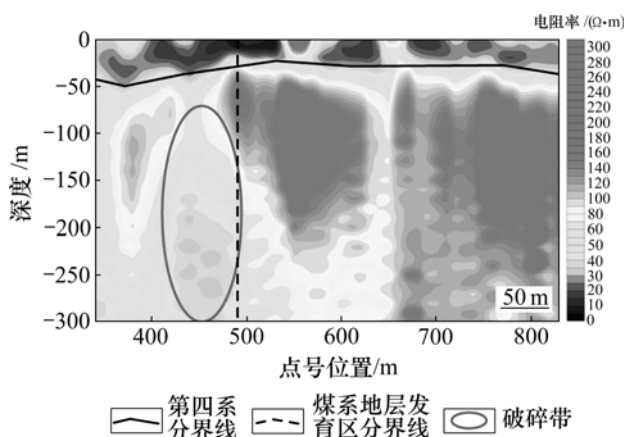


图5 NS520剖面CSAMT电阻率反演结果图

Fig.5 CSAMT inversed resistivity of line NS520

4.2 CSAMT 的深度切片上电性变化特征

CSAMT 的水平切片图如图6所示。从图6可见不同深度范围内的电性变化过程:在深度为50 m的水平切片上,大面积呈低阻区域,出现的高电阻率基本不大于100 $\Omega \cdot m$,灰岩地区与其他岩层的分界如图中虚线所示。F断裂与煤系地层的区别在于:深度为50 m的切片上位置不确定,原因是在这个深度范围内基本由第四系覆盖层覆盖。但随着深度的增加,从切片图上可以明显看到F断裂和由F断裂发育的煤系地层与其他地层的分界面。

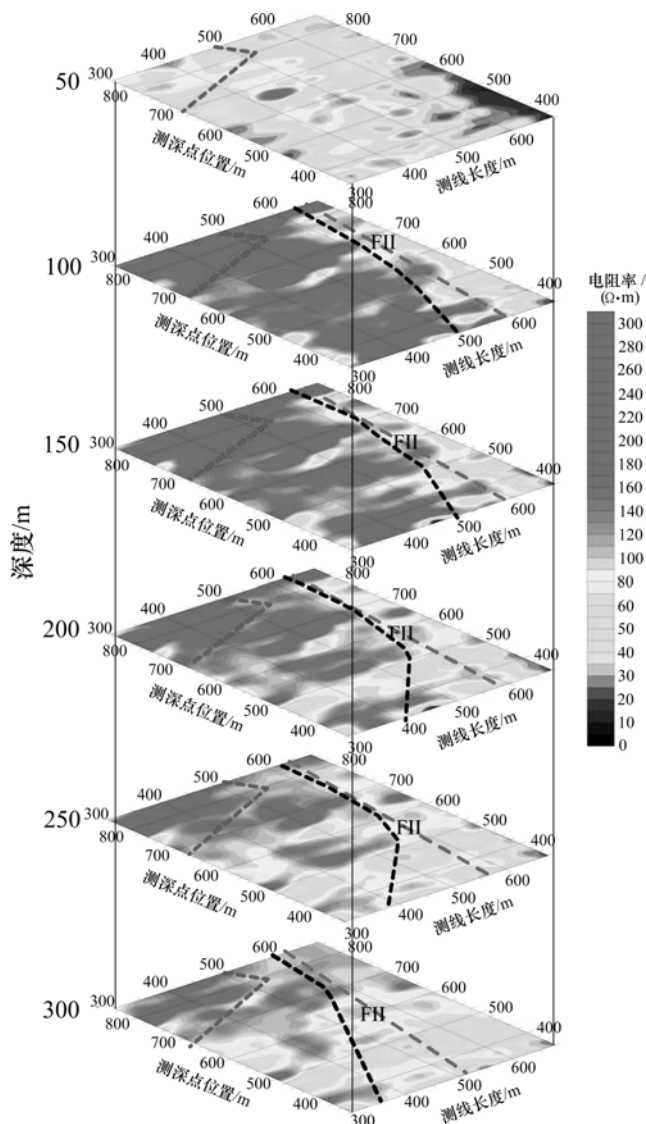


图6 水平切片图

Fig.6 Slices map of depth 50~300 m

4.3 钻探结果

该区域断裂附近也是煤层汇集地带,断裂两侧有多层煤层发育,左侧煤层更发育。由断裂对岩体完整性的影响可知:在区域断裂附近,小构造(节理、裂隙、次级断层)十分发育,加之受砂岩、泥岩夹有煤层煤系地层岩性条件的综合影响,这些小构造也是场区内可能存在煤田采空区的隐患区域。

在详查阶段,按地球物理方法提供的资料进行钻探工作,在场区内共布置8个钻孔,其中各有1个钻孔经过NS320线与NS520线。NS320线上的钻孔主要是为验证NS320及NS300线上自地表至深部的贯穿性低阻异常而设置,目的是揭露低阻异常的地层岩性特征。钻探结果见图7。从图7可以看出:

(1) 第四系覆盖层厚32.8 m,表现为低阻异常。

(2) 覆盖层下为石炭、二叠纪砂岩和泥岩互层, 岩芯十分破碎, 长期接触阳光、空气, 易崩解; 在地表以下 70~80 m 地层中揭露两段破碎带, 主要由黏性土、碎石及砂岩全风化产物组成, 厚度不大。

(3) 钻孔位置揭露地层岩性为石炭、二叠系砂岩、泥岩等, 局部夹有薄层灰岩和方解石脉。自覆盖层以下揭露的基岩均十分破碎, 含水丰富, 为含水构造破碎带。

(4) 由于基岩破碎, 节理、裂隙发育, 作为地下水的通道, 地层含水丰富。由于 CSAMT 对低阻异常十分敏感, 故此处结果表现为自上而下的贯穿性低阻异常。

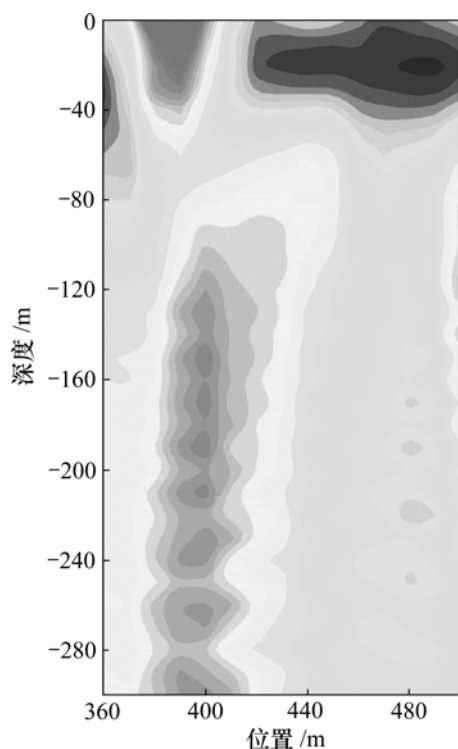


图 7 NS320 线 CSAMT 异常钻探分析图

Fig.7 Drilling results in station of line NS320

NS520 线上的钻孔位于场区南侧某煤矿井田边界三角区范围内, 可能存在采空现象, 而据 CSAMT 数据反演结果, 又未见明显异常。钻孔的目的是为了揭露井田边界内是否存在煤田采空现象, 钻探结果见图 8。从图 8 可见:

(1) 第四系覆盖层厚 40 多 m, 表现为低阻异常。

(2) 覆盖层下为石炭、二叠系砂岩和泥岩互层, 上部岩芯十分破碎, 呈强风化、全风化状态, 岩芯长期接触阳光、空气容易崩解, 表现为低阻异常。

(3) 80 m 以下电阻率增大, 地层岩性均为砂岩, 呈中风化、微风化状态, 与上部地层相比完整性较好,

故电阻增大; 见厚薄不同的煤层, 未见采空层。

(4) 130~180 m 揭露地层为砂岩和泥岩, 完整性较好, 夹有煤层和薄灰岩层, 未见采空层和其他异常地层情况, 与地球物理勘探结果较吻合。

据钻孔揭露地层情况, 场区南侧的某煤矿井田边界区内地表以下 180 m 范围地层中未见煤田采空层, 此处覆盖层较厚, 80 m 以内岩体完整性差, 80 m 以上深岩体完整性较好。

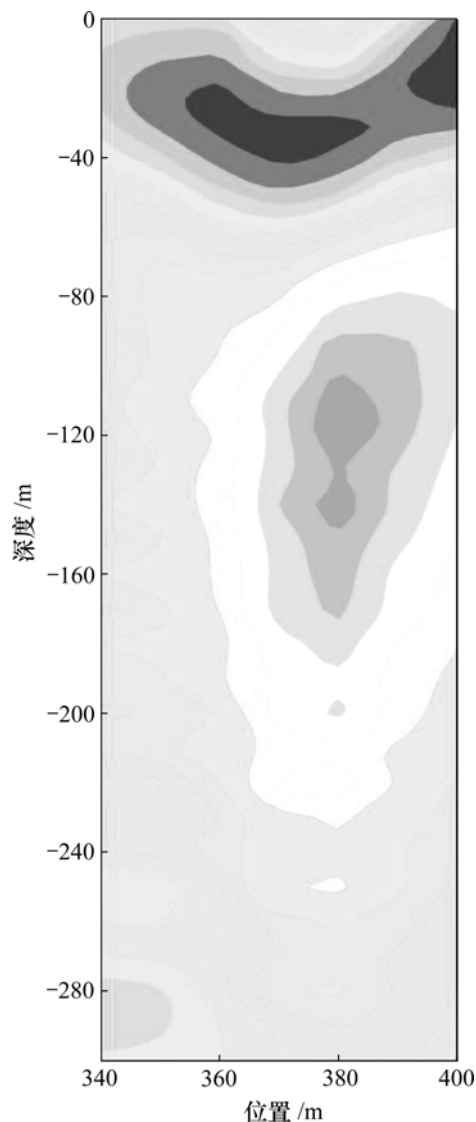


图 8 NS520 线 CSAMT 异常钻探分析图

Fig.8 Drilling results in station of line NS500

4.4 地基场地区块划分

根据反映异常的不同, 将场区进行区块划分, 主要分为 2 个大区, 编号分别为 A 和 B, 如图 9 所示。由于 A 区地层岩性的差异, 将其划分为 2 个亚区, 分别为 A₁ 区和 A₂ 区。根据地质资料和详勘资料分析, A₁ 区覆盖层下多为奥陶纪灰岩, 为主要的浅部岩溶发

育区;A₂区覆盖层下为砂岩、泥岩地层,局部存在含水构造破碎带,表现为贯穿性低阻异常;B区中包含横穿场区的断层F,其两侧地层中含有多层煤层,断层东侧煤层最发育,受断层和含煤地层采煤的综合影响;B区岩体完整性差,物探解译为大面积低阻异常,尤其是东南角和南侧低阻异常更显著。由于煤层交错,此区域可能有煤田采空层。图9中,D₁~D₈为钻孔位置。

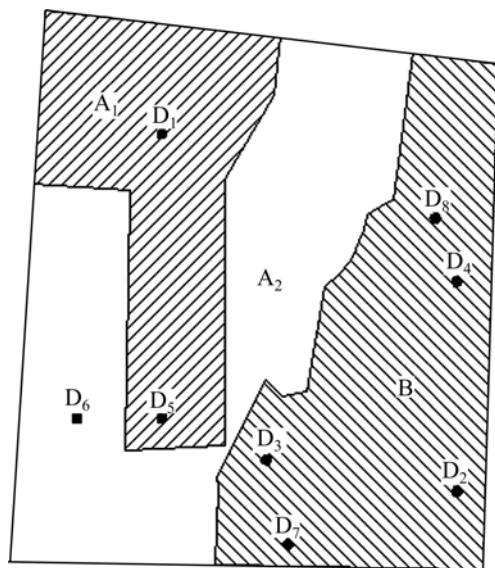


图9 场区评价分区图

Fig.9 Evaluation zone of working area

由于场区位于市中心繁华地带,工业干扰对勘探结果的影响较大,尽管采用了多种方法去噪和消除非均匀地表的影响,但受勘探方法的限制,对个别异常的判断可能存在误差。然而,由于有多条测线控制,结果可以相互佐证、相互比较,可以反映异常体的效果并能满足工程建设需要。

根据物探异常类型布设钻孔勘探工作,依据物探成果提出每个钻孔需验证的地质异常特征,共完成验证钻孔8个,全断面取芯,个别地段由于地层破碎或受地下水的影响,取芯率偏低,总体达到了清晰揭露地层的目的。通过钻孔揭露地层以及物探剖面与钻孔揭露地层的对比分析结果可见:物探揭示异常得到了验证,各类异常均得到了充分揭示。

5 结论

(1) 将CSAMT应用于人文干扰和电磁干扰强烈闹市区的场地评价,取得较好的效果。

(2) 针对强电磁环境中资料处理的难点,采用多种数据处理办法和多测线比较,获取了场区内可靠的三维(3D)电阻率。通过研究断面图和不同深度的水平切片图的电性分布,对场区的地基基础进行合理划分与评价,CSAMT探测结果和钻探结果一致,为工程建设提供了强有力的地球物理支持。

(3) 较准确地确定了场地内岩溶的位置、规模、地下采空区的位置、断裂的位置、产状及其覆盖层厚度。

参考文献:

- [1] 陈灿华, 廖秀英, 陈绍裘. 高速公路不同地层路基中岩溶洞穴的探测[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(6): 1014-1018.
CHEN Can-hua, LIAO Xiu-ying, CHEN Shao-qiu. Explore karst in different stratas of highway roadbed[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2004, 35(6): 1014-1018.
- [2] 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 Zi-quan, YIN Cheng. Application of schlumberger transverse profiling method to detecting buried faults[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(2): 625-631.
- [3] 吴子泉, 谭捍东, 王成虎. 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 Zi-quan, TAN Han-dong, WANG Cheng-hu. Application of electric resistivity transverse profiling method to detect oblique faults precisely[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(4): 1296-1301.
- [4] 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 Deng-hai, WANG Li-feng, SUN Jie, et al. Effects of urban noise on electromagnetic methods[J]. Seismology and Geology, 2002, 24(4): 549-556.
- [5] 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(Suppl): 115-118.
YI Bing, ZENG Zhao-fa, LI En-ze, et al. The survey and research for alive fault in city by electrical prospecting[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(Suppl): 115-118.
- [6] 刘廷忠, 冯辉. 在城市地质工作中应重视一种新型电磁法: 可控音频大地电磁法的应用[J]. 城市地质, 2006, 1(1): 41-48.
LIU Ting-zhong, FENG Hui. A new electromagnetic method in urban geological work: The application of CSAMT[J]. City

- Geology, 2006, 1(1): 41–48.
- [7] 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 Zi-quan, LIU Yuan-sheng, LIU Bao-jin, et al. Application of geophysical method to the precise positioning of urban seismic mobile moving fault[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(2): 528–533.
- [8] Zonge K L, Ostrander A G, Emer D F. Controlled-source audiofrequency magnetotelluric measurements[C]//Vozoff K. Magnetotelluric methods. Soc Expl Geophys Geophysics Reprint Series, 1986, 5: 749–763.
- [9] Zonge K L, Hughes L J. Controlled source audio-frequency magnetotelluric[C]//Electromagnetic methods in applied Geophysics. Tulsa: Soc Expl Geophys, 1991, 2(B): 713–809.
- [10] 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 Qing-yun, WANG Miao-yue, SHI Kun-fa, et al. An applied study on prevention of water bursting disaster in mines with the high resolution V6 system[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(5): 1–5.
- [11] 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 Qing-yun, SHI Kun-fa, WANG Miao-yue, et al. Water resources exploration with CSAMT and high density electric resistivity method[J]. Progress in Geophysics, 2001, 16(3): 53–54.
- [12] 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 Qing-yun, WANG Miao-yue, SHI Kun-fa, et al. Multifunction system V6 and its effectiveness in CSAMT exploration[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(4): 663–670.
- [13] 底青云, 王光杰, 王妙月, 等. 长偶极大功率可控源激励下目标体电性参数的频率响应[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 275–280.
- DI Qing-yun, WANG Guang-jie, WANG Miao-yue, et al. Frequency response characteristics of target electric property with long bipole large power control source[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(1): 275–280.
- [14] 底青云, 伍法权, 王光杰, 等. 地球物理综合勘探技术在南水北调西线工程深埋长隧洞勘察中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3631–3638.
- DI Qing-yun, WU Fa-quan, WANG Guang-jie, et al. Geophysical exploration over long deep tunnel for west route of South-to-North water transfer project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3631–3638.
- [15] 底青云, 王妙月, 王若, 等. 长偶极大功率可控源电磁波响应特征研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1917–1928.
- DI Qing-yun, WANG Miao-yue, WANG Ruo, et al. Study of the long bipole and large power electromagnetic field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(6): 1917–1928.
- [16] 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 Lu-ping, SHI Kun-fa. Application of CSAMT to the search for ground water[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1996, 39(5): 712–717.
- [17] 魏文博, 金胜, 叶高峰, 等. 西藏高原中、北部断裂构造特征: INDEPTH()-MT 观测提供的依据[J]. 地球科学, 2006, 31(2): 257–265.
- WEI Wen-bo, JIN Sheng, YE Gao-feng, et al. Features of the faults in center and north tibetan plateau: based on results of INDEPTH()-MT[J]. Earth Science, 2006, 31(2): 257–265.
- [18] 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 Shi-ze, LIU Bin. A numerical method for calculation MT field on a layer model with continuous change of conductivity in each layer[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(3): 262–268.
- [19] 王光杰, 王勇, 李帝钐, 等. 基于遗传算法 CSAMT 反演计算研究[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1285–1289.
- WANG Guang-jie, WANG Yong, LI Di-quan, et al. The application of genetic algorithm to CSAMT inversion[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(4): 1285–1289.

(编辑 陈灿华)