

CSAMT法在高速公路长大深埋隧道 勘察中的应用研究

孙英勋^{1,2}

(1. 昆明理工大学, 昆明 650093; 2. 云南省公路规划勘察设计院, 昆明 650011)

摘要 CSAMT法是一套综合了MT和AMT各自优点的电磁自动采集和处理系统。本文介绍了CSAMT的原理、特点、工作方法和资料处理。该系统首次运用于高速公路长大深埋隧道勘察中, 结合其它手段, 成功解译出了隧道的软弱层、地下水及断层破碎带的位置, 为划分隧道围岩类别提供了较好的依据, 同时也为高速公路长大深埋隧道提供了一种新的勘察方法。

关键词 桥隧工程, CSAMT, 可控源音频大地电磁法, 长大深埋隧道, 高速公路

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2005)04-1184-06

Application of CSAMT electromagnetic image system in survey of deeply-buried long tunnels for expressways

SUN Ying-xun^{1,2}

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Yunnan Highway Planning Prospecting and Design Institute, Kunming 650011, China)

Abstract CSAMT system is of electromagnetic auto collecting and analysis system. It has advantages both from MT and AMT. The Paper discusses the principle, characteristics, working methodology and data analysis of CSAMT. For the first time this system is applied in surveying deeply-buried long tunnel in Expressway in Yunnan. Combined with other technical methods CSAMT successfully interprets the location of soft and weak layer, underground water and broken fractures. The CSAMT provides good rationale for the classifying of surrounding rocks of the tunnel. It is a new methodology for surveying and investigating deeply-buried long highway tunnels.

Keywords bridge and tunnel engineering, CSAMT, controlled source audio-frequency magnetotellurics technology, deeply-buried long tunnel, expressway

0 引言

目前公路系统运用最多的方法为地震折射波法、面波法、地震测井、高密度电法、电测深法, 少数采用了地震反射波法, 但或多或少存在探测深度浅、速度慢、地形影响大、精度低等问题。长大深埋隧道由于其平面里程长、埋深大、地质构造复杂等特点, 一直是公路工程地质勘察的难点。可控源音频大地电磁法(简称CSAMT)是近十几年来迅速发展起来

的一种电磁法勘探新技术, 它具有工作效率高、探测深度大、分辨率高、受地形影响相对较小、抗干扰性能强、成本较MT低廉等特点。在1 km~2 km深度范围内, 能发现所有的电阻率差异较大的高、低阻不均匀体, 已成功运用在地矿、煤炭、石油、水利、水电系统的找矿、找水等具体工程中, 但在公路勘察方面的运用尚未有公开报道。

收稿日期 2005-04-11; **修回日期** 2005-08-20.

基金项目 云南省交通厅科技项目基金(811209A)资助。

作者简介 孙英勋, 1967年生, 男, 湖南新化人, 昆明理工大学在读博士生, 云南省公路规划勘察设计院副总工程师, 高级工程师, 主要研究方向为环境工程地质、岩土工程。(E-mail: Sunyingxun@sohu.com)

1 CSAMT 的工作原理

针对大地电磁法(MT)场源的随机性、信号微弱以及观测十分困难这一状况,加拿大多伦多大学的 D. W. Strangwag 教授于 1971 年提出了改进方案——采用可控制人工场源(简称 CSAMT)。根据电磁波传播理论,地面电磁波发送到地下,电磁波在岩土中的传播遵循 Maxwell 方程。如果假设大多数地下岩土为无磁性物质,并且宏观上均匀导电,不存在电荷积累,那么 Maxwell 方程就可简化为:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0, \quad (2)$$

式(1)和式(2)称为亥姆霍兹方程,其中

$$k^2 = \epsilon\mu\omega^2 + i\sigma\mu\omega,$$

k 称作复波数或传播系数。在 CSAMT 法中,测量的是彼此正交的电场和磁场的水平分量,并计算它们的模的比,即波阻抗(Z)。在远场区(即满足平面波的条件)为

$$Z = \left| \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{H}} \right| = \sqrt{\mu\omega\rho}, \quad (3)$$

式中 ρ 是电阻率, μ 是磁导率。通过上述(3)式可确定大地的电阻率(视电阻率),其计算公式为

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{H}} \right|^2, \quad (4)$$

式中 ρ 的单位是 $\Omega \cdot \text{m}$, \mathbf{E} 为电场分量,单位是 mV/km ; \mathbf{H} 为磁场分量,单位是 nT 。

大地的趋肤深度(δ)与频率有关,电磁波的透入深度随电阻率的增加和频率的降低而增大。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}. \quad (5)$$

频率与深度的关系是 CSAMT 法资料解释的一个主要问题,虽然趋肤深度从某种意义上来说与电磁波在介质中穿透的深度有关,但它并不代表实际的有效探测深度。探测深度 D 是一个比较模糊的概念,它大体上是指某种探测方法的体积平均探测深度。较好的经验公式是

$$D = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}}. \quad (6)$$

2 CSAMT 的野外工作方法

2.1 设备组成

CSAMT 仪器包括发射装置和接收装置两部分,发射设备为大功率发电机及发射机,接收系统包括数字化多功能接收机和磁探头,发射机与接收机

之间,通过电台或其它通讯工具进行联系,保证频率改变准确无误(图 1)。目前常见的 CSAMT 设备有:美国 Zonge 公司生产的 GGT-6、10、25 发射机与 GDP-12、16、32 接收机,加拿大凤凰公司生产的 IPT 系列发射机与 V-4、5、6 接收机;此外还有美国 Geotronics 公司生产的 EMT-5000 系列发射机与 EMR-1 系列接收机、加拿大 Terra-Geotervex 公司生产的 607B 系列发射机与 607A 系列接收机等。本节仅介绍美国 Zonge 公司生产的 GGT-10 发射机与 GDP-16 多功能接收机。

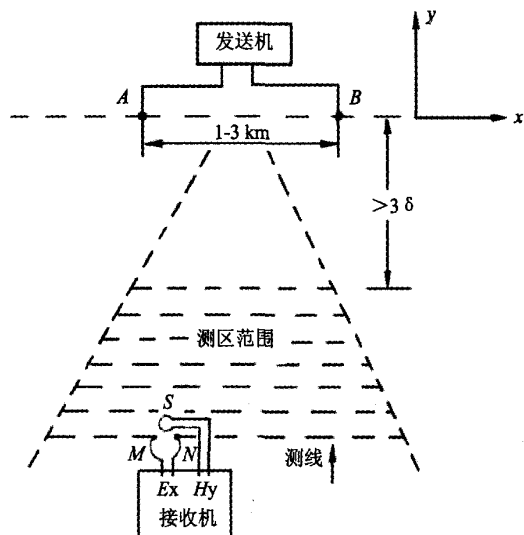


图 1 CSAMT 野外工作方法略图

Fig. 1 CSAMT working procedures on site

GGT-10 发射机可用于 CSAMT、TEM、CR、IP 等系统,最大输出功率 10kW,最高输出电压 1000V,频率从直流~10 kHz,其稳流精度为 $\pm 0.1\% \sim \pm 0.2\%$ 。

多功能接收机可进行 CSAMT、TEM、MT、AMT、CR、IP、激电法等工作,具有 8 个通道,可直接进行数据存取及数据处理,其主要技术参数为:1)最小分辨率 $0.03 \mu\text{V}$;2)自然电位补偿 $\pm 2.5 \text{ V}$;3)数模转换速度 $17 \mu\text{s}$;4)数字化率 32kHz。磁探头频率响应范围为 $0.125 \sim 8192 \text{ Hz}$ 。

2.2 设备布设

本次采用赤道偶极装置、标量观测方式;根据所测隧道埋深等因素,确定收发距,既要保证隧道洞深高程范围内的资料精度,又要使接受信号足够强,一般为 $5 \sim 10 \text{ km}$ 。设置供电偶极距 $AB = 1 \sim 3000 \text{ m}$,接收电偶极距 $MN = 10 \sim 150 \text{ m}$,磁探头方向与 MN

垂直。

2.3 数据采集

为保证采集到较高精度的资料,数据采集工作中应注意以下问题:

- (1) 保证接收机在有效观测区内工作;
- (2) 严格布设发射站,尽可能加大发射电流;
- (3) 做好接收机的校验、系统检查以及与发射机的同步工作,同时亦做好接收机的参数设置工作;
- (4) 认真检查接收站的布设情况,保证接地良好,线路畅通稳定;
- (5) 观测数据,数据记录不少于 2 次。

3 室内资料处理

资料处理流程见图 2。经过原始数据噪声剔除、数据格式转换计算(.RAW→.FLD→.Z)、静态效应改正、初始模型建立、每条测深曲线的一维光滑模型反演等步骤,最终输出电阻率断面图。

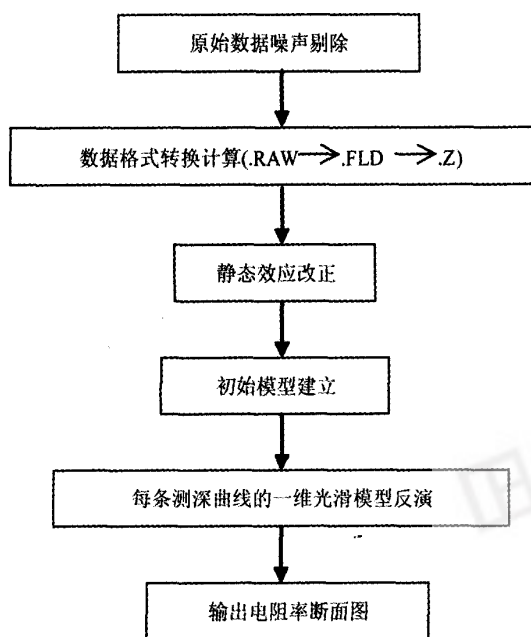


图 2 资料处理流程图

Fig. 2 Data processing chart

其中在静态校正流程中,采用参考相位空间滤波法,即沿测线设计某种低通滤波器进行空间滤波,压制静态效应;在初始模型建立~输出电阻率断面图的流程中,处理步骤为:

- (1) 首先给定测线起始测深点的初始模型,进行正演计算;
- (2) 计算正演曲线与实测曲线之间的离差;当离

差足够小时,跳至步骤 4),否则进行步骤 3);

(3) 修改模型,再进行正演计算,并重复步骤 2),直至达到一定迭代次数后,正演曲线与实测曲线间的离差足够小为止;

(4) 将此正演计算结果存储并作为紧邻下一个测深点的初始模型,重复步骤 1)~步骤 3)直至计算完整个测线的电测深曲线为止;

(5) 由正演计算结果的模型绘制“电阻率断面图”,并把资料处理中最终得到的电阻率断面图作为资料分析及解释的基本图件。

4 应用实例

4.1 项目概况

国道主干线 GZ40 二连浩特~昆明~河口公路水富至麻柳湾高速公路箭竹塘隧道位于云南省盐津县中和乡境内,山区地形、切割剧烈,高差大,交通极为不便。箭竹塘隧道为上、下分离式隧道,上行线起于 K73+720,止于 K74+970,全长 1 250 m,下行线起于 K73+760,止于 K75+030,全长 1 270 m;隧道最大埋深 345 m,进口端岩性以砂岩、泥质粉砂岩为主,中部以泥岩、泥质粉砂岩为主,出口端为玄武岩,表层有约 15 米覆盖层;沉积岩岩层产状为 $345^{\circ} \angle 65^{\circ}$,倾角较陡,区内断层较发育。

勘察的主要目的为:此次为初步设计阶段,要求查明隧道所经山体的断层、破碎带、富水带,为进一步查明隧道的工程地质条件、划分隧道的围岩类别提供物探依据,并指导施工图设计阶段的深钻孔布置。

因隧道埋深大、地表缺水、工期紧,初勘阶段隧道中部不可能布置深钻孔,也不能采用浅层物探方法,岩层倾角陡,地震反射也不太合适,故采用 CSAMT 方法。

从电性角度看,区内覆盖层、泥岩的电阻率最低,大约为 $n \times 10 \Omega \cdot m$,砂岩、泥质粉砂岩的电阻率大约 $n \times 10^2 \Omega \cdot m$,玄武岩的电阻率大约 $n \times 10^3 \Omega \cdot m$,砂岩、泥质粉砂岩的电阻率较泥岩高约 10 倍,而玄武岩的电阻率较砂岩、泥质粉砂岩的电阻率亦高约 10 倍,可见,该区具备开展 CSAMT 电磁探测的电性条件。

4.2 野外工作方法

本次物探使用的仪器为美国 Zonge 公司生产的 GDP-16 可控源音频大地电磁仪,物探工作于 2003 年 9 月 24 日开始,11 月 4 日提交正式成果资料,共作 CSAMT 法测深点 261 个,完成测线两条,

长度分别为 1 280 m 和 1 260 m,总长为 2 590 m,分别沿隧道中线方向布置 CSAMT 测线,测点点距为 10 m.采用赤道偶极装置、标量观测方式,确定收发距 $X=6\,000\text{ m}$,供电偶极距 $AB=2\,100\text{ m}$,接收电偶极距 $MN=10\text{ m}$,磁探头方向与 MN 垂直,数据采集频点为 4~4 096 Hz,尽可能加大发射电流,其中 4~1 024 Hz 的发射电流为 4.5 安培,最高频点 4 096 Hz 的最小发射电流为 2.4 安培.

4.3 室内资料处理与解译

4.3.1 资料成果

资料按前述方法进行处理,得到箭竹塘隧道两张上、下行线的 CSAMT 反演断面图(图 3、图 4),

图中水平坐标代表公路里程桩号(如:K73+800),垂直坐标代表地面高程.

4.3.2 成果解译

隧道成果解译的关注点为隧道设计线附近的地质情况,下文所述一般指隧道位置(设计线附近)的相关情况.

(1)岩性解译

从图 3、4 可知,箭竹塘隧道地层电阻率值变化范围为 60~1 600 $\Omega\cdot\text{m}$,电阻率整体呈高一低一高变化规律,进口端岩性以砂岩、泥质粉砂岩为主,电阻率值变化范围为 160~500 $\Omega\cdot\text{m}$;中部以泥岩、泥质粉砂岩为主,电阻率值变化范围为 60~160 $\Omega\cdot\text{m}$;出口端为玄武岩,电阻率值变化范围为 160~1 600 $\Omega\cdot\text{m}$;覆盖层 60~160 $\Omega\cdot\text{m}$,厚 0~15 m.

设计线附近具体的岩性初步解译成果见表 1.

值得一提的是,上行线 K74+520—+560、下行线 K74+680—+720 均出现垂直陡变的高阻异常,野外发现玄武岩中有较多的弱风化辉绿岩脉,结合区域地质、地调、探槽等资料综合分析,高阻异常形成垂直断层的可能性小,故推测为弱风化较破碎的辉绿岩脉.

(2)构造解译

根据最低电阻率、电阻率以高倾角骤降和低阻向深部延伸特征,结合野外现场调查与区域地质情况,上、下行线各判断出 6 条断层(F1~F6),并大致推测出断层破碎带宽度.构造初步解译成果详见表 2.

表 1 箭竹塘隧道岩性初步解译成果表
Table 1 Initial Interpretation result of rock properties of Jianzhutang tunnel

| 上行线 | 电阻率($\Omega\cdot\text{m}$) | 岩性 | 风化程度 | 下行线 | 电阻率($\Omega\cdot\text{m}$) | 岩性 | 风化程度 |
|-----------------|------------------------------|----------|------------|-----------------|------------------------------|----------|------------|
| K73+720~+780 | 60~250 | 覆土、砂岩 | 砂岩呈强风化,破碎 | K73+760~+800 | 60~260 | 覆土、砂岩 | 砂岩呈强风化,破碎 |
| K73+780~+900 | 300~500 | 砂岩 | 强~弱风化 | K73+800~+970 | 200~390 | 砂岩 | 强~弱风化 |
| K73+900~K74+170 | 150~250 | 泥质粉砂岩 | 强~弱风化 | K73+970~K74+130 | 130~200 | 泥质粉砂岩 | 强~弱风化 |
| K74+170~+640 | 60~160 | 泥岩、泥质粉砂岩 | 强风化破碎 | K74+130~+630 | 60~200 | 泥岩、泥质粉砂岩 | 强风化破碎 |
| K74+640~+950 | 600~1600 | 玄武岩 | 强~弱风化 | K74+630~+980 | 400~2500 | 玄武岩 | 弱风化 |
| K74+950~+970 | 500~1200 | 玄武岩、覆土 | 玄武岩呈强风化,破碎 | K74+980~K75+030 | 500~1400 | 玄武岩、覆土 | 玄武岩呈强风化,破碎 |

表 2 箭竹塘隧道构造初步解译成果表
Table 2 Initial Interpretation Result of Jianzhutang Tunnel Structure

| 上行线 | 里程桩号 | 断层性质 | 倾向 | 破碎带宽(m) | 富水状况 | 下行线 | 里程桩号 | 断层性质 | 倾向 | 破碎带宽(m) | 富水状况 |
|-----|---------|------|----|---------|------|-----|---------|------|----|---------|------|
| F1 | K73+905 | 逆断层 | 南西 | 20 | 较富水 | F1 | K73+975 | 逆断层 | 南西 | 20 | 较富水 |
| F2 | K73+170 | 正断层 | 南西 | 60 | 富水 | F2 | K74+135 | 正断层 | 南西 | 40 | 较富水 |
| F3 | K74+270 | 正断层 | 北东 | 40 | 富水 | F3 | K74+270 | 正断层 | 北东 | 40 | 富水 |
| F4 | K74+460 | 正断层 | 北东 | 40 | 富水 | F4 | K74+390 | 正断层 | 北东 | 40 | 富水 |
| F5 | K74+640 | 逆断层 | 北东 | 30 | 较富水 | F5 | K74+620 | 逆断层 | 北东 | 20 | 较富水 |
| F6 | K74+815 | 逆断层 | 北东 | 20 | 较富水 | F6 | K74+830 | 逆断层 | 北东 | 30 | 较富水 |

(3)含水带解译

根据最低电阻率、隔水层岩性、构造富水等特

性,结合区域地质情况,上、下行线各含水带主要分布断层(F1~F6)附近,另外上行线在 K74+270~

+460、K74+560~+580 及下行线在 K74+270~+390、K74+560~+580 也较为富水。

(4)围岩类别的确定

根据电阻率的变化、断层、破碎带、岩性、隧道埋深、隧道设计线高程等特征,结合区域地质情况、地质调查、浅部钻孔情况,综合判断出上、下行线的围岩类别(详见表 3)。

4.3.3 解释成果的验证

经施工图设计阶段的浅层物探及钻孔验证,除局部里程位置上存在差异外,基本上相互吻合。主要原因因为工区地形变化较大,测量定点不够精度,增加了 CSAMT 资料的解释难度所致。

表 3 箭竹塘隧道围岩类别划分成果表

Table 3 Classification of surroding rocks for Jianzhutang tunnel

| 上行线 | 围岩类别 | 下行线 | 围岩类别 |
|------------------|------|------------------|------|
| K73+720~+830 | Ⅱ | K73+760~+810 | Ⅱ |
| K73+830~+890 | Ⅲ | K73+810~+960 | Ⅲ |
| K73+890~ K73+910 | Ⅱ | K73+960~ K73+980 | Ⅱ |
| K73+910~ K74+160 | Ⅲ | K73+980~ K74+130 | Ⅲ |
| K74+160~+650 | Ⅱ | K74+130~+640 | Ⅱ |
| K74+650~+780 | Ⅳ | K74+640~+820 | Ⅳ |
| K74+780~+830 | Ⅱ | K74+820~+840 | Ⅱ |
| K74+830~+920 | Ⅲ | K74+840~+970 | Ⅲ |
| K74+920~+970 | Ⅱ | K74+970~K75+030 | Ⅱ |

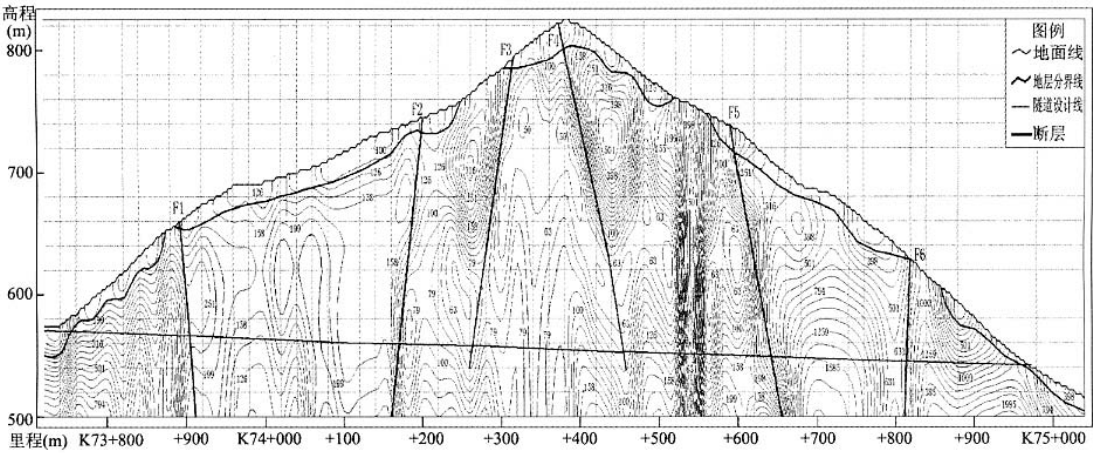


图 3 箭竹塘隧道上行线的 CSAMT 反演断面图

Fig. 3 Resistance Profile of Jianzhutang Tunnel UTL CSAMT Method

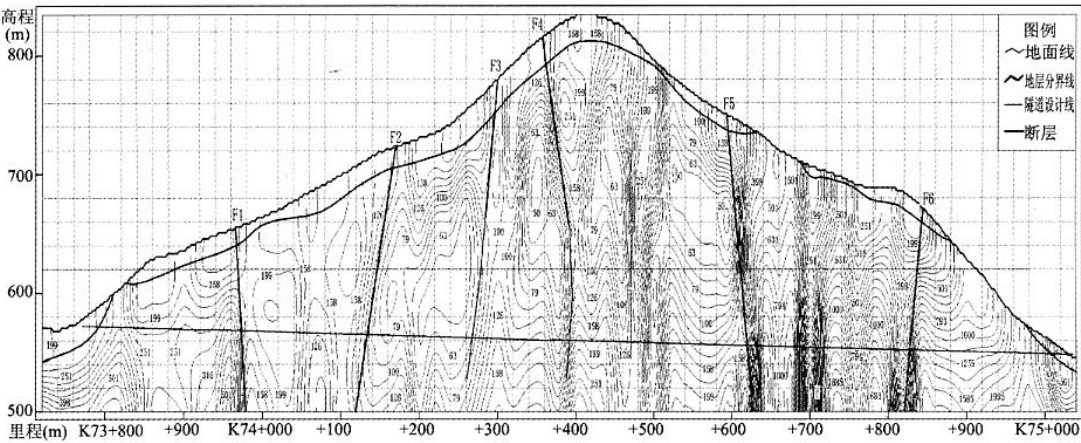


图 4 箭竹塘隧道下行线的 CSAMT 反演断面图

Fig. 4 Resistance Profile of Jianzhutang Tunnel DTL CSAMT Method

5 结 论

(1)利用 CSAMT 方法成功地在复杂地形地质条件下对箭竹塘隧道的岩性、构造、地下水进行了解译,结合区域地质情况、地质调查情况进行了围岩类别的划分,达到了预期效果,并经后期勘察工作的验证与实际情况基本吻合。

(2)CSAMT 具有工作效率高、探测深度大、分辨率高、受地形影响相对较小、抗干扰性能强、成本较 MT 低廉等特点,在 1 km~2 km 深度范围内,能发现所有的电阻率差异较大的高、低阻不均匀体,是高速公路长大深埋隧道勘察的一种行之有效的技术手段,值得加以推广应用。

(3)由于 CSAMT 不能提供岩体波速,局部具

有多解性,工作中应尽量采用多种勘察手段,并用少量钻孔加以验证,使地质成果更接近实际情况。

参 考 文 献 (References):

- [1] 何继善等编译.可控源音频大地电磁法[M].长沙:中南工业大学出版社,1990.
- [2] 吴璐苹,石昆法等.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.
- [3] 石昆法,张庚利等. CSAMT 法在山东蓬家乔地区层间滑动角砾型金矿成矿预测中的应用[J].地质与勘探,2001,37(1):86~90.
- [4] 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.
- [5] 余才盛.堤防防渗芯墙质量检测技术及效果[J].地球物理学进展,2003,18(3):410~415.