

# 深埋长隧道洞线岩性 CSAMT 法分析研究

安志国, 底青云, 王光杰

(中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 深埋长隧道的地球物理勘查工作主要是探测洞线高程附近的隐伏不良地质体的赋存情况。深埋长隧道的不良地质体主要为断层和破碎带, 可控源音频大地电磁(CSAMT)法对于勘查这些不良地质体则是一种比较有效的方法。对西南一改建铁路进行 CSAMT 法勘查隧道洞线不良地质体的研究。结合 CSAMT 法对于本区的原始数据的质量要求, 以及后期数据处理, 特别对正常地层和存在断层、破碎带等不良地质体的典型视电阻率-频率曲线进行分析, 了解这些特征构造的电性响应; 对经过圆滑处理后数据进行反演, 反演后的数据与原始数据进行拟合对比, 判断反演的合理性。结合研究区钻孔所获得的地质信息, 对 CSAMT 结果进行地质解释和验证。研究结果表明, CSAMT 法在勘查深埋长隧道岩性分析方面具有可行性, 对于隧道施工有一定的指导意义。

**关键词:** 隧道工程; 深埋长隧道; 可控源音频大地电磁(CSAMT)法; 岩性分析; 隧道施工

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2008)增 1-3286-06

## ANALYTICAL STUDY ON ROCK PROPERTY OF LONG-DEEP TUNNEL WITH CSAMT METHOD

AN Zhiguo, DI Qingyun, WANG Guangjie

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

**Abstract:** In geophysical exploration work for deep-long tunnel, the issue is mainly concentrated on bearing conditions of potential unfavourable geologic body near the area of tunnel line. As for deep-long tunnel, the unfavourable geologic bodies mainly include fault and fractures, and because of distinct electric differences between unfavourable geologic body and surrounding medium, the controlled source audio frequency magnetotelluric(CSAMT) method is used to detect such unfavourable geologic bodies. CSAMT method has been adopted for the study on rock property of tunnel line about rebuilt railway in southwestern area. Based on related standard or literatures on CSAMT method, the data are firstly introduced. With the effective data, indoors data processing can be done. The much attention is paid on the analysis of typical apparent resistivity frequency curves, especially on unfavourable geologic body. The electric response of these unfavourable geologic bodies can be known and the differences between normal stratum and those containing unfavourable geologic bodies can be determined. Smoothing process can be done on original data and then processed data can be inverted. With the comparison between inverted data and original data, the fitness curves can be obtained. It is the fitness information that can help us determine the effect of inversion results. If the fitness data are too large to get correct inverted data, processing flow would return to smooth processing and should change parameters to invert again till getting correct result. Combined with geologic information of relative boreholes, the geologic interpretation can be carried out, and inverted results can also be verified. The study results show that CSAMT method is effective in exploring unfavourable geologic bodies and it is applicable for the analysis of rock property of tunnel line. Therefore, CSAMT method is an instructive guide for tunnel construction.

**收稿日期:** 2006-11-21; **修回日期:** 2007-03-08

**基金项目:** 中国地质大学(北京)地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室开放课题项目(GDL0705); 中国科学院重要方向资助项目(kzcx2-yw-121, kzcx2-yw-113-1)

**作者简介:** 安志国(1977-), 男, 博士, 2000年毕业于中国地质大学(北京)地球物理系应用地球物理专业, 主要从事电磁法的正反演方面的研究工作。  
E-mail: 2008dreamfuture@163.com

**Key words:** tunnel engineering; deep-long tunnel; controlled source audio frequency magnetotelluric(CSAMT) method; rock property analysis; tunnel construction

## 1 引言

中国科学院地质与地球物理研究所受铁道第二勘察设计院委托在西南地区某改建铁路 14 km 长的隧道洞线开展地球物理勘探工作, 按照勘探合同书的要求, 在铁路路线范围内查明隧洞高程范围内不良地质体的赋存情况, 为隧道的设计提供基础资料。

根据测区的地形以及工程项目要求, 本次地球物理工作主要采用可控源音频大地电磁法(CSAMT 法)。目前 CSAMT 法已被广泛应用到矿产资源<sup>[1-3]</sup>、采矿过程中的地质隐患<sup>[4-5]</sup>、地下水和地热<sup>[6-9]</sup>的地球物理勘察中, 均取得了较好的应用效果。隧道工作的研究成果<sup>[10-13]</sup>有些已经发表, 但是其研究重点都有所不同。本次研究工作主要从实际数据出发, 分析实测视电阻率曲线, 特别是正常地层和断层、破碎带上的视电阻率-频率曲线, 对正常地层和不良地质体的电性响应进行研究归纳, 并通过对比拟合反演后的结果与原始数据, 对钻孔加以验证, 证实 CSAMT 法分析洞线岩性的可行性和有效性, 再结合实际剖面采用上述的办法给出合理的解释, 给隧道施工提供很好的依据和指导。

## 2 测区简介

### 2.1 测区自然地理

测区属中高山构造侵蚀、溶蚀地貌, 地形陡峻、起伏较大, 高程 1 660~2 360 m, 自然坡度 30°~50°, 最大相对高差约 700 m。隧道穿越数条横向沟谷, 最大埋深 535 m。平行导坑长 6 765 m。全线地表植被发育, 少量山间沟谷被垦为耕地, 其余为灌木树林。

### 2.2 地层岩性特征

测区缓坡及低洼地带覆盖第四系全新统滑坡堆积层、冲洪积、坡残积粉质黏土和黏土等; 下伏基岩为昆阳群柳坝塘组、绿汁江组、鹅头厂组、落雪组、因民组、美党组泥岩、粉砂岩、砾岩、白云岩、板岩、灰岩和石英砂岩等。各地层岩性分述如下:

(1) 石英砂岩夹板岩: 石英砂岩浅灰色, 细粒

结构, 厚层状, 岩质坚硬。板岩暗灰、青灰色, 薄层状, 砂泥质结构。中高阻。

(2) 白云岩、灰岩: 肉红、米黄、灰白色, 薄~中层状, 致密隐晶质, 节理、裂隙较发育, 层间常见泥质、泥灰质条纹。岩溶较发育, 地表多见刀砍状溶痕, 半山偶见干溶洞。高阻, 若有岩溶发育含水则电阻率就会相应的降低。

(3) 板岩夹砂岩、白云岩: 板岩以绢云母板岩、粉砂质板岩为主, 褐灰、深灰色, 薄层状, 泥质或粉砂质, 节理、裂隙发育, 岩体较破碎。白云岩灰白色, 薄~中层状, 致密隐晶质, 节理、裂隙较发育, 地表见刀砍状溶痕, 厚度不稳定, 零星分布。中高阻。

(4) 灰岩、白云岩: 浅灰、深灰色, 细~中粗晶, 中厚层~厚层状, 岩质硬脆, 地表见龙潭、洼地、溶洞, 岩溶发育。中高阻。

(5) 板岩夹砂岩: 板岩为黄褐、褐灰、深灰色, 千枚状结构, 薄~中层状, 受构造影响, 节理发育, 岩体呈针状破碎, 该地层局部夹有炭质板岩, 局部炭质含量较高。含炭质板岩电阻率表现为低阻。

(6) 绢云母板岩、炭质板岩、石英砂岩: 绢云母板岩为深灰、紫灰色, 砂泥质结构, 薄层状, 可见绢云母, 炭质板岩为灰黑、深灰色, 污手, 薄层状, 泥质结构, 节理发育, 岩质软。石英砂岩为浅灰色, 细粒结构, 中厚~厚层状, 局部夹透镜状灰岩。该地层中炭质板岩、炭质含量高。低阻。

## 3 CSAMT 法岩性分析

可控源音频大地电磁法(CSAMT 法)是利用人工场源发射变频电磁信号的一种测深技术<sup>[14-15]</sup>。理论上讲, 两端接地的电偶极子向地下供交变电流, 感应出反映地下电性介质的电磁场, 运用 CSAMT 法测量感应出的电场和磁场, 再根据 Cagniard 电阻率公式计算视电阻率, 通过模型和视电阻率曲线的拟合反演, 可以得到各研究区块的电性深度资料, 从而获得对地电结构的认知。CSAMT 法的主要优点如下:

(1) 人工场源, 抗干扰能力强;

(2) 卡尼亚电阻率，比值测量，减少地形的影响；

(3) 勘探深度范围大，一般可达 1~2 km；

(4) 横向分辨率高，可灵敏地发现断层；

(5) 高阻屏蔽作用小，可穿透高阻层。

### 3.1 数据质量

数据的处理和解释都是围绕质量好的数据来开展工作的。因此，为了保证能够得到质量良好的数据，在正式开展工作前，首先对仪器进行标定以确定仪器处于良好的工作状态。为了使仪器适应较宽噪音背景的工作状态，本文分别对仪器各道各频率的 12 个增益进行标定，测量时仪器根据信噪比情况选择最佳的信噪比增益。各增益标定曲线非常圆滑，一致性也非常好，表明仪器处于良好的工作状态。

在数据采集期间，除了要做到测量点距准确外，还应加大供电电流，反复检查发射偶极定位是否准确。实测数据中每个频点的相对误差一般都在 10% 以下，大部分是 5%，这个精度符合《可控源声频大地电磁法勘探技术规程》(SY/T 5772-2002)对 CSAMT 法的规范要求。把原始观测数据与重复观测数据列成表格，然后按百分相对误差的公式进行计算：

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $M$  为百分相对误差， $m_i$  为某一频点上原始观测的视电阻率值与检查观测的视电阻率值误差的绝对值除以两次观测的平均值， $n$  为检查并参与计算误差的总点数。

经过统计和计算，舍去了误差特大的 6 个突变点(数量小于总观测值点数的 1%)，其百分相对误差值小于 5%，满足 CSAMT 法工作质量的要求。表 1 列出的数据为 1 910 点(百分相对误差为 6.3%)重复检查的结果。对于这样的点要进行加大信号、增加迭代次数以及下文中涉及到的相关的方法进行数据处理。

这次数据采集采用 GPS 同步发射和接收，4F30 频率序列，共 54 个频点，采用这样的频点加密方法既可以了解曲线形态趋势，又能达到提高纵向分辨率的目的。由于篇幅的原因，只给出了 14 个频点的对比结果。

在保证数据质量的可靠性后，然后采取以下的技术进行数据处理。

表 1 检查点对比表

Table 1 Data comparison of checking points

频率 /Hz	电阻率 1 /( $\Omega \cdot m$ )	电阻率 2 /( $\Omega \cdot m$ )	平均电阻率 /( $\Omega \cdot m$ )	相对误差/%
1.0	11 761.7	10 464.8	11 113.3	11.7
2.0	14 435.9	15 199.8	14 817.9	5.2
4.0	17 531.2	18 108.4	17 819.8	3.2
8.0	20 021.9	22 070.4	21 046.2	9.7
16.0	18 961.4	19 429.8	19 195.6	2.4
32.0	13 601.8	14 231.9	13 916.9	4.5
64.0	8 168.4	8 211.1	8 189.7	0.5
128.0	4 542.4	4 876.4	4 709.4	7.1
256.0	3 058.2	2 676.0	2 867.1	13.3
512.0	2 080.7	2 120.3	2 100.5	1.9
1 024.0	2 182.5	2 314.5	2 248.5	5.9
2 057.1	1 797.2	1 946.8	1 872.0	8.0
4 114.3	1 332.2	1 472.9	1 402.6	10.0
8 228.6	701.0	736.8	718.9	5.0

### 3.2 CSAMT 法数据处理的一般步骤

首先对野外采集的数据进行分析、去噪、静态校正及近场校正等处理，然后进行一维、二维反演成像处理，资料处理流程如图 1 所示。

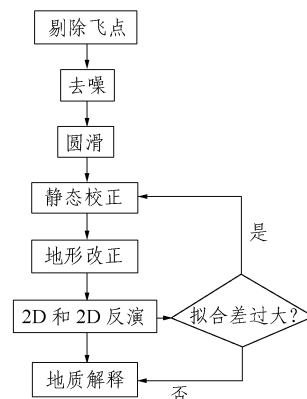


图 1 资料处理流程图

Fig.1 Data processing flow

经处理得到反演后的电阻率断面图，电阻率用分等级的彩色显示。在 CSAMT 法反演断面图上，将电阻率异常的部分结合地质状况进行分析，勾划出断层的位置、产状，地层界线，洞线位置，溶洞或溶蚀区以及可能对工程有影响的危险区等。

### 3.3 CSAMT 法典型曲线分析

在地质解释前，分析得到的视电阻率曲线及正常地层和断层、破碎带的电性响应差异，并结合相

关的地质资料, 给出合理的解释。

图 2 表示测点在正常地层的视电阻率和相位曲线。从视电阻率 - 频率曲线可以看出, 高频段视电阻率值约为  $100 \Omega \cdot m$ 。随着频率降低, 视电阻率逐渐升高, 在频率 200 Hz 左右时出现过渡区, 电阻率变化不大, 频率进一步变小时, 电阻率曲线又开始上升, 这是典型的完整岩层的岩性变化标志。

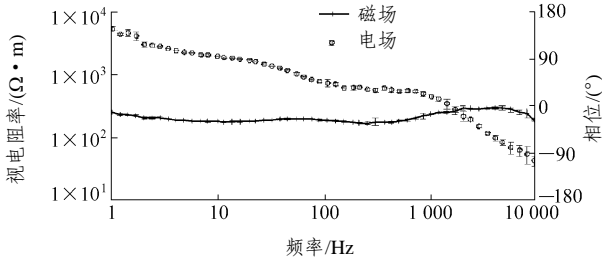


图 2 正常地层视电阻率和相位曲线

Fig.2 Apparent resistivity and phase curves of normal stratum

图 3 为存在断层或破碎带时的视电阻率和相位响应曲线。从图 3 可以看出, 在这些站点上高频段视电阻率值仍为  $100 \sim 200 \Omega \cdot m$ , 但随着频率降低, 直到 100 Hz 左右电阻率仍不是很高, 大约  $200 \Omega \cdot m$  以后, 曲线形态逐渐抬升, 到 10 Hz 左右到达峰值, 随后电阻率又开始变小, 说明存在电阻率低  $\rightarrow$  高  $\rightarrow$  低的岩性分层。地球物理推断可能存在断层或者破碎带等低阻层。

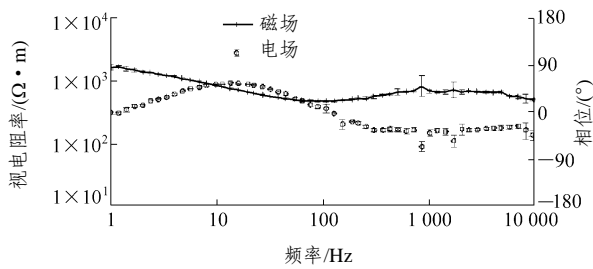


图 3 断层上视电阻率和相位曲线图

Fig.3 Apparent resistivity and phase curves of fault structure

### 3.4 拟合分析

得出反演结果后, 作者对反演结果和原始数据进行拟合比对, 表 2 是上述经过断层上的 1 310 m 点及其电阻率 - 频率曲线的拟合结果。从表 2 可以看出, 拟合差都小于 6%; 图 4 为原始数据和反演结果拟合, 从图 4 拟合曲线图上也可以看出, 视电阻率 - 频率曲线和反演后的视电阻率 - 频率曲线非常的接近, 两者拟合得很好, 很好地反映出各层的岩性变化, 也说明反演结果真实可靠。

表 2 原始数据和反演结果拟合表

Table 2 Fitness of original data and inverted data

频率 /Hz	电阻率/ $(\Omega \cdot m)$		拟合误差/%
	原始数据	反演数据	
1.00	574.2	542.4	5.5
2.00	470.0	460.0	2.1
4.00	580.5	547.7	5.7
8.00	750.3	708.7	5.5
11.29	768.4	726.8	5.4
16.00	809.3	766.9	5.2
22.43	788.4	749.3	5.0
32.00	686.2	655.8	4.4
44.86	583.7	562.2	3.7
64.00	454.3	443.4	2.4
90.00	369.9	366.1	1.0
128.00	288.6	278.7	3.4
189.50	218.4	214.3	1.9
256.00	184	181.5	1.4
369.20	152.2	150.3	1.2
512.00	149.6	146.2	2.3
724.50	138.4	135.0	2.5
1 024.00	127.5	124.9	2.1
1 440.00	144.5	140.5	2.8
2 057.00	157.4	152.9	2.9
2 880.00	162.8	158.5	2.7
4 114.00	183.8	178.0	3.2

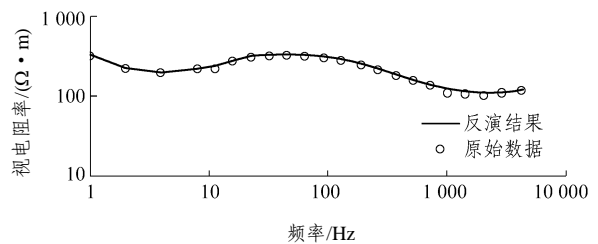


图 4 原始数据和反演结果拟合

Fig.4 Fitness curve of original data and inverted result

### 3.5 钻孔验证

用已有的 2 个钻孔来验证本文的结果。钻孔 1 和钻孔 2 的部分岩芯分别见图 5, 6。

(1) 钻孔 1: 位于 430 m 处, 打钻 64 m, 其中 0~11 m 为第四系坡积物半破碎泥质板岩和砂板岩 12~18 m 为炭质板岩, 炭质含量高, 质软; 19~64 m, 较完整的炭质板岩。在 CSAMT 法解释图中表现为深色的低阻, 延续深。



图5 钻孔1部分岩芯

Fig.5 Part rock sample in borehole 1



图6 钻孔2部分岩芯

Fig.6 Part rock sample in borehole 2

(2) 钻孔2: 位于610 m处, 打钻60 m, 0~24 m为第四系风化层, 含有破碎的砂岩成分, 24 m以下为白云岩。在解释图对应位置上表现为浅部低阻, 然后高阻。

#### 4 CSAMT 法分析岩性实例

通过以上的分析研究, 在实际的剖面地质解释中, 参考已有的地质资料, 分析区域地质的特点, 考虑可能的不利于工程施工的地质现象, 并结合对

正常地层和断层、破碎带等的视电阻率 - 频率响应, 以及各地层电阻率范围, 也分析均匀厚层和薄厚层组合以及泥质岩和灰岩组合的宏观电阻率结构特点, 对照图7, 分段解释如下:

(1) 水平距离0~160 m段。根据地面地质资料及深部电阻率分布, 推断为侏罗系地层。160 m处存在向西倾斜的断层F1。对应地质上的大官田断层。

(2) 水平距离160~900 m段。深部以高阻为主, 推断为板岩和灰岩互层。该段浅部有数十米厚的低阻层分布, 局部可能含有低阻的煤系地层。低阻层属于板岩页岩等煤系地层, 或者是表层风化的灰岩。从电阻率上两者没有明显的区别。虽然隧道洞线以下的电阻率较高, 但并不能改善洞深附近围岩的工程地质条件, 反而容易造成错觉。加之该段属于隧道进口, 一般较难进占, 所以, 从进口到900 m一段属于施工条件差的区段。要注意加强支护, 防止塌方和渗水。

(3) 水平距离900~1 180 m段。该段属于较稳定的区段, 电阻率整体偏高, 推断为灰岩。该段施工条件相对较好。

(4) 水平距离1 180~1 680 m段。该段有较大断层F2通过, 断层延伸过洞深, 在大里程一侧, 有次级断层伴生, 所以该段围岩工程地质条件差, 应加强支护, 防止塌方。加上从大里程到该段属于汇水区域, 施工中还应注意断层中可能发生突水突泥问题。断层F2对应地质上的东山河逆断层。

(5) 水平距离1 680~2 200 m段。该段电阻率普遍偏高, 结合地表地质, 该段解释为灰岩段。洞深穿过稳定的灰岩区。电阻率变化不大, 施工条件较好。但由于围岩受应力较大, 应加强围岩支护, 防止围岩形变, 对洞壁造成的破坏及垮塌。

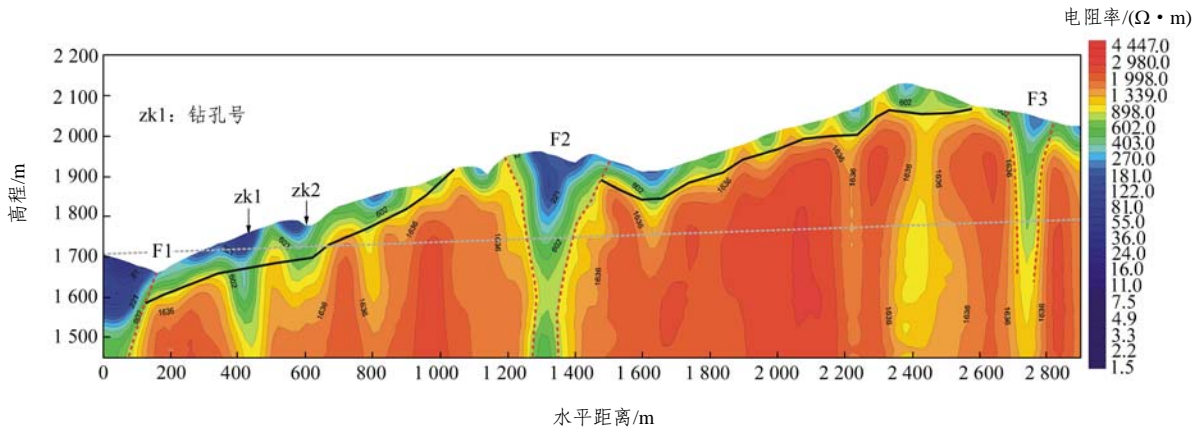


图7 CSAMT 法反演解释图

Fig.7 Inversion and interpretation map of CSAMT method

(6) 水平距离 2 200~2 900 m 段。该段整体表现为高阻。但在高阻中夹有低阻, 并在水平距离 2 700~2 770 m 发育一个近直立的断层 F3, 断层在洞线的宽度是 70 m。结合地表地质分析, 该段左侧处于向斜的中心位置, 与段内 2 400 m 附近的低阻带相对应。上述两种情况对隧道施工都会产生不利影响, 施工中应注意加强防护, 主要是防止突水, 其次是防止软岩塌方及断层 F3 对应地质上的大龙潭断层。

## 5 结 论

(1) 在取得了可靠的 CSAMT 法资料, 进行典型视电阻率曲线分析, 特别是正常地层和断层、破碎带的对比分析, 反演后的结果和原始曲线进行拟合对比, 分析反演的合理性和有效性, 获得合理的反演断面图。通过钻孔验证, 证实了 CSAMT 法对深埋长隧道洞线岩性分析研究的可行性。

(2) 文中提到的对工程可能有较大影响不良地质体, 应进一步勘探研究, 结合其他的地球物理方法, 毕竟用多种探测手段加以对比和验证, 可以增添说服力, 确保施工安全。

### 参考文献(References):

- [1] BASOKUR A T, RASMUSSEN, KAYA T M, et al. Comparison of induced-polarization and controlled-source audio-magnetotelluric methods for massive chalcopyrite exploration[J]. *Geophysics*, 1982, 47(1): 100 - 116.
- [2] BASOKUR A T, RASMUSSEN T M, KAYA C, et al. Comparison of induced-polarization and controlled-source audio-magnetotelluric methods for massive chalcopyrite exploration in a volcanic area[J]. *Geophysics*, 1997, 62(6): 1 087 - 1 096.
- [3] 于昌明. CSAMT 法在寻找隐伏金矿中的应用[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(1): 133 - 138.(YU Changming. Application of CSAMT method to looking for hidden gold mine[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1998, 41(1): 133 - 138.(in Chinese))
- [4] 于昌明, 石昆法, 高宇平. CSAMT 法在四台矿 402 盘区陷落柱构造探测中的应用[J]. *地球物理学进展*, 1996, 11(2): 137 - 147.(YU Changming, SHI Kunfa, GAO Yuping. Looking for fallen columns of coal mine by CSAMT method in No.402 area of Datong city[J]. *Progress in Geophysics*, 1996, 11(2): 137 - 147.(in Chinese))
- [5] 底青云, 王妙月, 石昆法, 等. 高分辨 V6 系统在矿山顶湧水隐患中的应用研究[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(5): 1 - 5.(DI Qingyun, WANG Miaoyue, SHI Kunfa, 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.(in Chinese))
- [6] WANNAMAKER P E. Tensor CSAMT survey over the Ulphur springs thermal Valles Caldera, New Mexico, USA, part II: implications for CSAMT technology[J]. *Geophysics*, 1997, 62(2): 466 - 476.
- [7] SANDBERG S K, HOHMANN G W. Controlled-source audio magnetotelluric in geothermal exploration[J]. *Geophysics*, 1982, 47(1): 100 - 116.
- [8] 吴璐莘, 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 Luping, SHI Kunfa. Application of CSAMT to the search for groundwater[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1996, 39(5): 712 - 717.(in Chinese))
- [9] WANNAMAKER P E. Tensor CSAMT survey over the ulphur springs thermal Valles Caldera, New Mexico, USA., part I: implications for structure of the western Caldera[J]. *Geophysics*, 1997, 62(2): 451 - 465.
- [10] 王 若, 王妙月, 底青云, 等. CSAMT 法在隧道勘察中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(增 1): 43 - 45.(WANG Ruo, WANG Miaoyue, DI Qingyun, et al. An application of CSAMT method in tunnel prospecting[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2004, 39(Supp.1): 43 - 45.(in Chinese))
- [11] 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道勘察中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(20): 3 631 - 3 638.(DI Qingyun, WU Faquan, WANG Guangjie, 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): 3 631 - 3 638.(in Chinese))
- [12] 李志华. 某新建铁路复杂长隧道岩层地质与 CSAMT 特征[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(4): 1 190 - 1 195.(LI Zhihua. Geology and CSAMT character of long complex railway tunnel[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(4): 1 190 - 1 195.(in Chinese))
- [13] 李金都, 王学潮. 南水北调西线工程区活动断层 CSAMT 技术探测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(17): 2 932 - 2 936.(LI Jindu, WANG Xuechao. Application of CSAMT method to prospecting active fault of West Route of South-to-West Water Transfer Project[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(17): 2 932 - 2 936.(in Chinese))
- [14] GOLDSTEIN M A. Magnetotelluric experiments employing an artificial dipole source[Ph. D. Thesis][D]. Toronto: University of Toronto, 1971.
- [15] GOLDSTEIN M A, STRANGWAY D W. Audio frequency magnetotelluric with a grounded dipole source[J]. *Geophysics*, 1975, 40(4): 669 - 683.