

某新建铁路复杂长隧道岩层地质与 CSAMT 特征

李志华

(铁道第三勘察设计院,天津 300251)

摘 要 分析了多种地球物理勘探方法在复杂长隧道探测中的优缺点,指出了 CSAMT(可控源音频大地电磁)法在工作条件极其困难,地形复杂,交通不便,要求勘探深度大的隧洞勘察中,是一种行之有效的物探手段.以较高的显示度列举了 CSAMT 法在本区探测成功的实例.就隧道主要特殊岩层膏溶角砾岩的地球物理异常特征进行了详尽分析,给出了 CSAMT 法在本区隧道结构面综合地质解释结果.

关键词 复杂长隧道,CSAMT 特征,地质特征,膏状角砾岩

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2005)04-1190-06

Geology and CSAMT character of long complex railway tunnel

LI Zhi-hua

(The third survey and design ministry of railway, Tianjin 300251, China)

Abstract This paper analyses the advantages and disadvantages of many geophysical exploration methods which are used in long complex railway tunnel, and points out that CSAMT (Control Source Audio-frequency Magnetotelluric Method) is a powerful exploration method of applied geophysics for deeper and complex geology structure exploration. The paper shows some successful examples of CSAMT survey in the area studied. The resistivity anomalies for the typical geology layer of gypsum breccia in this railway tunnel are particularly analyzed, and the integrated interpretation results for CSAMT survey conducted for the tunnel is illustrated.

Keywords complex long tunnel, CSAMT characteristics, geology property, gypsum breccia

0 引 言

对于复杂的特长、深埋岩溶隧道的勘探,是一个国际性的难题.由于隧道区地形条件,造成地球物理场分布的严重畸变,容易形成各种形态各异的假异常.地形的复杂多变,难以找到合适的校正模型把真正异常从复杂地形干扰异常中分离出来,目前世界各国(包括发达国家)至今都没有一种特别有效的地面勘探方法.

上世纪 80 年代初期铁路勘察从日本引进了地震折射表层剥去法,在地形变化点增加炮点,解决了地形变化对地震折射的影响,同时解释的深度也得到了提高.近年来国内也有成功应用该技术的经验^[1].由于远炮偏移距不能无限制扩大,限制了地震的探测深度.上世纪 80 年代末期,尝试采用高密度

电法对隧道的断层和岩溶等进行勘察^[2],并开发了相应的数据处理和地形校正软件,方法也不断得到完善,但是高密度电法的勘探深度有限,并且不适用于陡峻深切的地形条件.

成熟用于研究深部大地构造、石油勘探和工程勘探的地震反射法一般都在地形较为平缓,地层缓倾、岩性均匀的地区应用,在地形切割严重、地层产状陡倾的地区地震法无法取得反射波的信号,地质效果不理想.

目前国内能用于山区长隧道深层勘探的方法主要为音频大地电磁法.对于工区工作条件极其困难,地形复杂,交通不便,要求的勘探深度大的隧洞勘察,选择的物探手段必须能够在如此复杂的环境下开展工作,并能满足勘探的深度和达到勘探的目的.多年来的工作体验表明,可控源音频大地电磁法

(CSAMT 法)是一种行之有效的隧洞勘察物探手段^[3]。

地球物理方法勘探的目的就是要通过采集的地球物理数据去尽可能多地确定与地质结构有关的信息。可控源音频大地电磁法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数据来达到勘探地球内部导电性结构的。其工作频率一般从万赫兹到零点几赫兹,因此其勘探深度一般从地表至地下 1 500 m 左右。自七十年代中叶起,CSAMT 法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,并广泛应用^[4-12]。1991 年 Zong 和 Hughes^[13]及国内一些电法专家^[14-18]对电法尤其是电磁方法应用做了较好的归纳。并且随着 CSAMT 方法应用中遇到的一些理论技术难点,近年来地球物理研究人员做了大量的研究工作。例如,CSAMT 法的近场校正问题^[19]、地形校正问题^[20-23]、静态问题^[24,25]以及反演方法^[26-29]本身的研究,使得该方法在实际应用中的成功率大大提高。

本文将讨论石太线某特长、复杂隧洞的地质特征、主要岩层和构造的 CSAMT 特征及对工程的意义。

1 勘探区的工程地质特征及任务目的

1.1 工程地质特征

新建铁路线路经过河北、山西两省,全长约 198 km。线路穿越复杂的太行山区,经过太行山山前平原、井陘盆地、剥蚀-侵蚀的太行山地、沁水盆地、晋中盆地等多个大型的地貌单元,跨多个地表水、地下水分水岭,并通过大面积奥陶、寒武系可溶岩地区。

特长隧道位于太行山脉中南段剥蚀中低山区及山西黄土高原两大地貌单元内,其中太行山脉剥蚀中低山区内山峰林立,绵延起伏,形成了形态各异的陡崖、峭壁、单面山。峡谷深切,多呈“V”字型,地形起伏较大,最大高差约 600.0 余米。峡谷中无水,均为干谷。山上植被较为稀少,基岩裸露,呈现山地地貌的典型特征;隧道 DK83+800~DK97+155 段,位于山西黄土高原上,区内呈现典型的黄土高原地貌特征:黄土崩、塬、梁地貌发育,“U”字型冲沟纵横交错,地形平坦开阔,起伏相对较小,最大高差约 100 m,表覆第四系松散堆积层,大部辟为耕地。

最长隧道 27.848 km,为国内目前最长的越岭隧道;一般最大埋深约为 450m。特长隧道地处多个大地构造单元内,尤其是在沁水断陷盆地边缘地带,发育了很多条长大、深大断裂,且隧道出口附近和东

陵井大都被第四系巨厚的松散堆积层所覆盖。因此断层破碎带、地下水、特殊岩土、岩溶、地层等为隧道的主要工程地质问题。

隧道区地层表覆第四系冲洪积层(Q₄^d)黏性土、砂类土及碎石类土,仅分布于阴山河谷阶地及部分河谷冲沟中,上更新统坡洪积层(Q₃^{di+pl})新黄土,中更新统洪积层(Q₂^{pl})老黄土,下伏石炭系上统太原组(C₃t)、中统本溪组(C₂b);奥陶系中统峰峰组(O₂f),上马家沟组(O₂S),下马家沟组(O₂x);寒武系上统凤山组(Є₃f),长山组(Є₂c),崮山组(Є₂g);寒武系中统张夏组(Є₂z),徐庄组(Є₂x);寒武系下统馒头组-毛庄组(Є_{1mi-mz}),大红峪组(Chd)及太古界(Art)片麻岩。

测区出露有第四系(Q)、石炭系(C)、奥陶系(O)、寒武系(Є)、太古界滹沱河群(Art),根据物探资料统计分析,各地层岩性在电阻率特性方面存在一定差异,具备开展地球物理勘探的前提条件。

1.2 CSAMT 勘察的主要地质任务

(1)断层:宽度、产状、位置,并分析断层的富水性和对隧道工程的影响。

(2)岩溶:形态、规模、深度及对隧道工程潜在的影响。

(3)地层:地层划分、构造形态、地层(尤其是隔水层)的厚度和深度,并分析隔水层的上覆和下伏层的含水情况以及隧道围岩的岩性。

2 CSAMT 勘查结果

CSAMT 法,是电法勘探中最近开发的勘测手段之一。该方法在距离测区一定距离,利用电偶极向地下发射一系列固定频率的强大电磁信号,在测区内一台或多台测量仪器同时同步接收。由于发射的信号属于音频范围内的频率,所以称为音频大地电磁测深。根据电阻率与不同频率电磁波趋肤的对应关系可知,该频段对应的优势勘测深度在 2 000 m 以上,对于解决工程地质问题是合适的方法选择。CSAMT 仪器装备近年来又有长足发展,发射功率进一步增大,接收机精度,抗噪能力不断提高。某公司已经将频点增大到传统频点之间八分频,而且频点进一步扩展,最高频率扩展到 16384 Hz,对浅层的分辨能力大大提高。

CSAMT 法基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组导出的水平电偶极源在地面上的电场及磁场公式:

$$E_x = (I \cdot AB \cdot \rho) / (2\pi r^3) \cdot (3\cos^2\theta - 2),$$

$$H_y = (1+i) \cdot (I \cdot AB) / (4\pi r^3) \cdot \sqrt{(2\rho) / (\mu\omega)} \\ \times (3\cos^2\theta - 2).$$

其中, E_x 为 x 方向电场强度; H_y 为 y 方向磁场强度; I 为供电电流强度; AB 为供电电极极距; ρ 为均匀半空间电阻率; r 为接收点到发射偶极的垂直距离. ω 为电磁波圆频率; μ 为岩石导磁率, 一般取为空气导磁率. θ 为接收点以偶极中心为原点对偶极中心垂线的张角.

在本区用 CSAMT 方法对整个长隧洞进行了勘察, 测点距离 25 m. 测区地层出露以近水平状为主, 最大倾角 15° , 总体岩性以各种灰岩为主, 石炭系, 二叠系只在局部分布. 所以整个测线以高阻为主, 整体呈现高阻背景. 岩石破碎或断裂时, 破碎带内由于充填泥质、粘土等低阻物质, 或弱含水、含水, 使得断裂带呈现不同程度的低阻. 由于整条剖面的结果太长, 文章中不宜全部展出, 因此文章以几处典型的 CSAMT 特征段介绍隧洞的地层结构特征.

在测线 DK93+900 km 处, CSAMT 测量结果显示低阻, 且低阻异常的形态为上小下大, 如图 1 所示.

异常处于单面坡偏上部位, 地表地形完整平滑. 根据 CSAMT 电性低阻异常特征, 在 DK93+872 右 10 m 布了钻孔, 坐标 N4221005 E456561, 孔口标高 1 039.85 m, 实际孔深 122.0 m. 当钻进到中途, 由于地层异常破碎, 钻杆被落石卡住. 平移后继续钻进, 直至完钻. 钻孔岩性依次为黄土, 未风化灰岩, 断层破碎带, 白云岩, 断层破碎带, 灰岩, 断层充填物, 断层泥夹角砾, 泥岩, 断层角砾岩, 断层角砾, 断层泥. 钻孔的岩样如图 2 所示: 0.0~13.0 m: 为黄土; 13.0~16.3 m: 灰岩, 未风化; 16.3~26.3 m: 断层破碎带; 26.3~27.6 m: 白云岩; 27.6~58.3 m: 断层破碎带; 58.3~65.1 m: 灰岩; 65.1~71.0 m: 断层充填物; 71.0~77.8 m: 断层泥夹角砾; 77.8~82.5 m: 泥岩; 82.5~98.3 m: 断层角砾岩; 98.3~119.0 m: 断层角砾; 119.0~122.0 m: 断层泥.

在测线 DK88+000~DK88+450 处和 DK89+050~DK89+350 处, CSAMT 测量结果显示两个明显低阻异常, 如图 3 所示.

DK88+000~DK88+450 处的异常向大里程倾斜, 上部呈条带状, 下部呈囊状, 该异常穿过洞线, 电阻率值较低, 在 100 欧姆米以下, 推测为断层破碎带和溶蚀区. 根据上述电性低阻异常, 在此处布设了一个钻孔. 钻孔里程为 DK88+235 右 16 m, 坐标 N4221667 E462162, 孔口标高 1 065.98 m, 实际孔深 213.20 m.

钻孔地层岩性: 0.0~11.3 m: 为黄土; 11.30~108.50 m: 为石炭系煤系地层, 以砂岩为主夹有泥岩、煤层等; 108.5~123.3 m: 豹皮灰岩夹白云质灰岩; 123.3~137.6 m: 灰岩; 137.6~141.4 m: 断层及断层影响带; 141.4~141.5 m: 炭质层; 141.5~160.0 m: 角砾状灰岩, 层内多处有溶蚀孔洞; 160.0~180.0 m: 角砾状泥灰岩, 170 m 以下破碎, 178~185 m 溶蚀孔洞集中发育呈蜂窝状; 180.0~184.8 m: 豹皮灰岩, 层内裂隙发育; 184.8~192.1 m, 角砾状泥灰岩, 187.6 m 以下很破碎; 192.1~192.7 m: 断层泥; 192.7~198.4 m: 角砾状泥灰岩, 岩石很破碎; 198.4~209.7 m: 泥粒豹皮灰岩, 岩石破碎裂隙十分发育; 209.7~210.5 m: 角砾状泥灰岩, 岩石很破碎; 210.5~213.18 m: 灰岩, 岩石很破碎.

3 本隧道主要特殊岩层特征分析

本隧道物探揭示特殊岩土层主要为: 膏溶角砾岩.

CSAMT 圈定的层状中低阻异常带在 DK87+500~DK89+800 段, 多处有显示, 从层位深度分析, 应为峰峰组下段, 低阻明显, 可能的解释为: (1) 泥灰岩层, (2) 层状岩溶层, 泥质充填, (3) 膏溶角砾岩. 层内存在若干更低阻的异常带、局部呈高低阻变化复杂、低阻夹高阻等, 可能由于断裂构造的作用, 造成岩层较多发育有小规模岩溶、含石膏岩层溶蚀可能形成膏溶角砾岩. 由于石膏层为低硬度, 易脆性碎裂, 在断裂构造活动中, 易发生层间错动, 如图 5 所示.

本区奥陶系峰峰组下段地层中常含石膏, 在杏村附近厚者可达 60 余米, 该层在洞线区域 DK88+000 m 以西的地层中都有分布, 并有西厚东薄的规律. 由于含石膏岩层较易溶蚀, 常常会引起所在地层结构上的变化. 在有断层因素影响时尤为明显, 在断层带附近出现溶蚀较重的地层.

在对本次的测试结果做解释时, 对该层电性特点进行了研究, 有如下的认识. DK88+000~DK89+800 段, 大约 100~300 m 深度, 普遍存在一中低阻层, 如图 3 所示. 分析认为相当于泥灰岩层. 在该泥灰岩层中出现了较多不规则小圈闭异常, 部分异常和小断层重合. 研究测量结果, 我们认为这些小圈闭, 特别是高低相间引起这一层电阻率细碎不规则变化区段是膏溶角砾岩、或岩溶多发段, 低阻明显部分含水. 由于部分段这类异常发生在近洞线和洞线下方, 岩层稳定性变差, 勘察和设计时应给予高度重视.

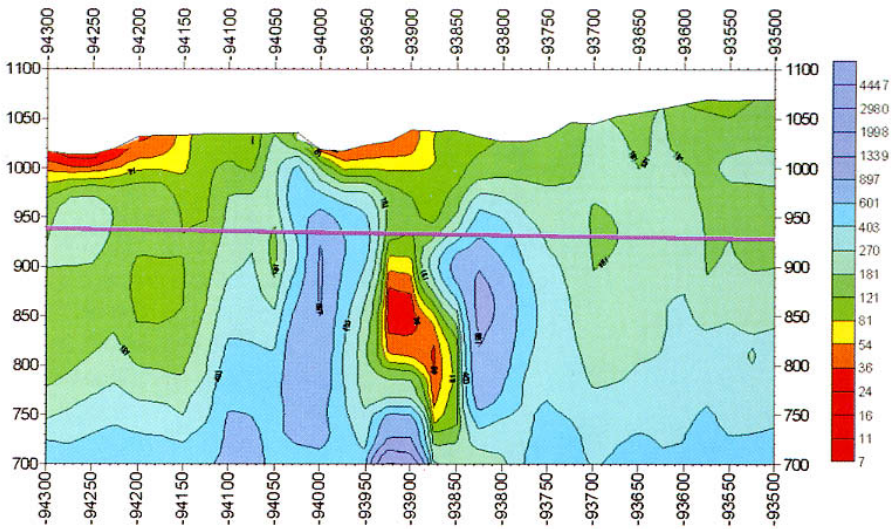


图 1 DK93+900 洞线下方的典型低阻异常

Fig. 1 The typical low resistivity anomaly close the position DK93+900

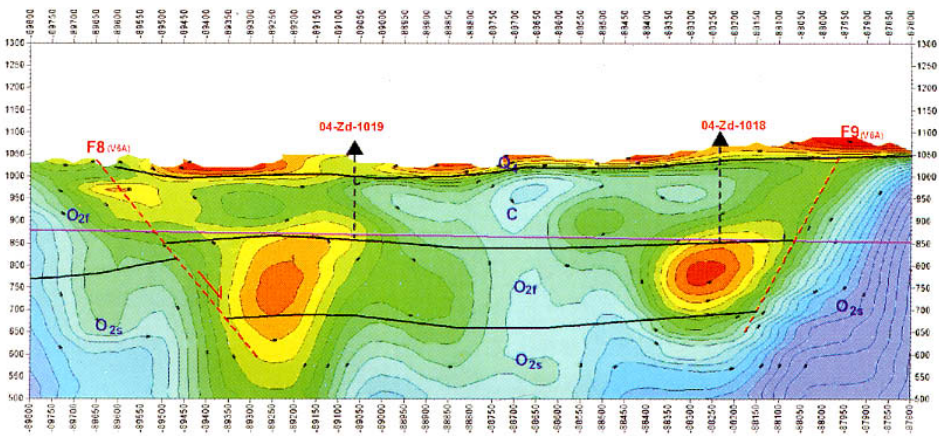


图 3 DK88+235 洞线附近的典型低阻异常

Fig. 3 The typical low resistivity anomaly close the position DK88+235



图 2 DK93+872 钻孔岩样

Fig. 2 Rock sample at the drilling well DK93+872



图 4 DK88+235 钻孔岩样

Fig. 4 Rock sample at the drilling well DK88+235

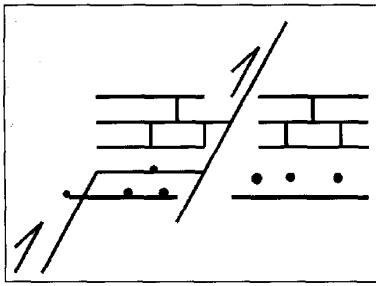


图5 错动断层示意图

Fig. 5 Displacement fault

4 隧道结构面综合地质解释结果

根据 CSAMT 反演结果,将隧道结构面解释出如下几个特征段并指出了对工程的影响。

从 DK97+200 至 DK87+050 段,表层灰岩之下明显有一低阻层,且有舒缓起伏,该层加厚部分上伏煤系地层或铝土矿层也发育,该层控制着石炭系地层的分布,推测应和奥陶系峰峰组下段相当。该段洞线埋深浅,地层变换复杂,工程上岩层稳定性较差,塌方渗水等都应给予注意。

DK87+050~DK81+300 段,其中 DK83+200 m 前主要为奥陶系马家沟组地层,物探显示为厚层高阻结构。另外 DK83+200~DK81+300 米段,主要为高阻灰岩段,依灰岩特征,推断为寒武系灰岩。

该段通过 F10、F11、F12、F13 几处断层影响(其中 F13 影响带较宽),该段工程中应注意岩层松动、破碎的危险。

DK81+300~DK78+700 洞线主要通过片麻岩老地层段。

DK78+700~DK69+650 段显示高阻。洞线多在寒武系地层中通过,该段高阻明显。但临近华北平原的强侵蚀地区,有些断层低阻不明显,应注意塌方等灾害。

5 结论

在地质条件复杂的长大深埋隧道勘测中,尤其对地形复杂的长大、深埋、岩溶型隧道,除详细的地表地质勘察外,需要探测更多的深部地质信息,这就需要合适的地球物理探测手段。有限的钻探难以满足这种需求,其他地面物探方法受不利因素的影响难于达到勘探的要求。本文介绍的 CSAMT 方法由于自身的特点能够提供大量深部地质信息,取得一定的勘探效果。

根据地电异常和隧洞的深度关系,布置了一系列钻孔,其中绝大多数见到了断层,破碎等结构异常。实践证明,结合该工区地质地球物理条件,选择 CSAMT 方法进行洞线工程地质勘查是有效的,达到了预期的效果。

参 考 文 献 (References):

- [1] 唐世庚,陈燕,梁志文,薛桂花. 瞬态面波和地震折射法在隧道勘察中的综合应用[J]. 物探与化探, 2004, 28(6):557~560.
- [2] 蒋伟宏,蒋正红,伍衡昭,等. 高密度电阻率法在隧道洞身病害探测中的应用[J]. 中国工程地球物理检测技术(2001), 地震出版社, 2001,162~165.
- [3] 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): 2932~2936.
- [4] Di Qing-yun, Wang Miao-yue, Shi Kun-fa, Zhang Geng-li, Mits Yamashita. CSAMT research survey for preventing water-bursting disaster in mining. Proceedings of the 106th SEGJ Conference[J]. The Society of Exploration Geophysicists of Japan, 2002, Tokyo.
- [5] Zonge K L, Ostrander A G, Emer D F. Controlled-source audio-frequency magnetotelluric measurements [A]. In Vozoff K, Ed, Magnetotelluric methods; Soc Expl[C]. Geophys Geophysics Reprint Series 5, 1986, 749~763.
- [6] Basokur A T, Rasmussen T M, Kaya C, Altun Y, Aktas K. Comparison of induced-polarisation and controlled-source audio-magnetotelluric methods for massive chalcopyrite exploration in a volcanic area[J]. Geophysics, 1997, 62(6): 1087~1096.
- [7] Sandberg S K, Hohmann G W. Controlled-source audio-magnetotelluric in geothermal exploration[J]. Geophysics, 1982, 47(1): 100~116.
- [8] 底青云,王妙月,石昆法,张庚利. 高分辨 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 Qingyun, Wang Miaoyue, Shi Kunfa, Zhang Gengli. CSAMT Research Survey for Preventing Water Flooding in Mining[J]. Geophysica Sinica, 2002, 45(5):1~5.
- [9] 吴璐萍,石昆法. 可控音频大地电磁法在地下水勘察中的应用研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39(5): 712~717.
- [10] Wannamaker P E. Tensor CSAMT survey over the Sulphur Springs thermal area. Valles Caldera, New Mexico, U S A, Part I: Implications for structure of the western equations [J]. Geophysics, 1997, 62(4): 451~465.
- [11] Batrel L C, Jacobson R D. Results of a controlled-source audio-frequency magnetotelluric survey at the Puhimau thermal area, Kilauea Volcano, Hawaii[J]. Geophysics, 1987, 52(4): 665~677.
- [12] Boerner D E, Wright J A, Thurlow J G, Reed L E. Tensor CSAMT studies at the Buchans Mine in central Newfoundland[J]. Geophysics, 1993, 58(1): 12~19.
- [13] Zonge K L, Hughes L J. Controlled source audio-frequency

- magnetotelluric[J]. In electromagnetic methods in applied Geophysics, 1991, 2(B): 713~809.
- [14] 刘国栋. 我国大地电磁测深的发展[J]. 地球物理学报, 1994, 37(Suppl.): 301~310.
- [15] 张赛珍, 王庆乙, 罗延钟. 中国电法勘探发展概况[J]. 地球物理学报, 1994, 37(Suppl.): 425~428.
- [16] 何继善. 电法勘探的发展和展望[J]. 地球物理学报, 1997, 40(Suppl.): 308~316.
- [17] 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用[J]. 北京: 北京科学出版社, 1999.
- [18] 何继善. 可控源音频大地电磁[J]. 长沙: 中国工业大学出版社, 1990.
- [19] Yamashita M, Hallof P G. CSAMT case histories with a multi-channel CSAMT system and discussion of near-field data correction[J]. Phoenix Geophys, Ltd, 1985.
- [20] Mac Inner S C. Lateral effects in controlled source audio-magnetotelluric[J]. Ph D dissertation, Univ of Arizona, Tucson, 1987.
- [21] 徐世浙, 赵生凯. 地形对大地电磁勘探的影响[J]. 西北地震学报, 1985, 7(4): 422~427.
- [22] Jiracek G R. Near surface and topographic distortions in topographic induction[J]. Survey in Geophysics, 1990, 11(1): 163~203.
- [23] Takeshi K, Addenda. The topographic effect in resistivity prospecting[J]. Geophysical Exploration (Butsuri-Tansa), 1953, 6(1): 51~54.
- [24] Boerner D E, Kurtz R D, Jones A G. Orthogonality in CSAMT and MT measurements, Geophysics, 58(7): 924~934.
- [25] Jimmy Stephen S G, Manoj G C, Singh S B. Effects of galvanic distortions on magnetotelluric data; Interpretation and its correction using deep electrical data[J]. Earth Planet Sci, 112(1): 27~36.
- [26] Sasaki Y, Yoshihiro Y, Matsuo K. Resistivity imaging of controlled-source audio-frequency magnetotelluric data[J]. Geophysics, 1992, 57(3): 952~955.
- [27] Routh P S, Oldenburg D W. Inversion of controlled-source audio-frequency magnetotelluric data for a horizontally-layered earth[J]. Expanded Abstracts, 66th Ann. Internat. Mtg, Soc Expl Geophys, 1996.
- [28] Lu X, Unsworth M, Booker J. Rapid relaxation inversion of CSAMT data[J]. Geophys J Int, 1999, 138(1): 381~392.
- [29] Badea E A, Everitt M E, Newman G A, Oszkar Biro. Finite-element analysis of controlled-source electromagnetic induction using Coulomb-gauged potentials[J]. Geophysics, 2001, 66(3): 786~799.