

# 南水北调西线工程区活动断层 CSAMT 技术探测研究

李金都<sup>1,2</sup> 王学潮<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>河海大学土木工程学院 南京 210098) (<sup>2</sup>黄河水利委员会设计研究院 郑州 450003)

**摘要** 结合南水北调西线工程调水区桑日麻断裂的探测, 就应用可控源音频大地电磁测深(CSAMT)进行断层深部特征的探测问题进行了分析和研究。研究表明, 可控源音频大地电磁测深法可用于探测断层深部的发育情况, 为分析工程地质问题提供基础性资料, 并且可以很好地指导钻探工作的布置。

**关键词** 地球物理, 可控源音频大地电磁测深, 断层深部特征, 电磁波

**分类号** P 631.3<sup>+</sup>25 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2004)17-2932-05

## APPLICATION OF CSAMT TO PROSPECTING ACTIVE FAULT

Li Jindu<sup>1,2</sup>, Wang Xuechao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098 China)

(<sup>2</sup>Reconnaissance, Planning, Design and Research Institute, YRCC, Zhengzhou 450003 China)

**Abstract** The feasibility problem of application of CSAMT to prospecting active fault in the West Route of South-to-North Water Transfer Project is studied. The study results show that CSAMT can be applied to prospect the characteristics of deep region of active fault for engineering design. Some beneficial conclusion and advice about geological prospect are obtained.

**Key words** geophysics, CSAMT, characteristics of deep region of fault, electromagnetic wave

### 1 CSAMT 方法基本原理和特点

长期以来, 人们可以运用多种勘探手段来了解所关心的工程区浅层地表的工程地质和水文地质问题; 但对于深部地质情况, 特别是断层深部的发育情况的了解一直缺乏比较有效的方法<sup>[1]</sup>。在地球物理探测中, 电法勘探由于其场源的多变性、方法的有效性, 已被人们所重视。其中, 可控源音频大地电磁测深(英文缩写 CSAMT)是 20 世纪 80 年代后期兴起的一种电法技术, 通过 CSAMT 方法地质工

程师可以对地下较深部位的地质情况进行判断<sup>[2~4]</sup>。在南水北调西线工程地质勘察中, 首次在调水地区进行了区域断层的 CSAMT 方法探测, 以研究区域断层的深部发育情况。

CSAMT 法基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组, 导出了电场强度( $E_x$ )、磁场强度( $H_y$ )与电阻率的关系式:

$$\rho_s = \frac{|E_x|^2}{5\beta|H_y|^2} \quad (1)$$

式中:  $\rho_s$  为电阻率, 也称为卡尼亚电阻率;  $\beta$  为频

2004 年 4 月 23 日收到初稿, 2004 年 6 月 10 日收到修改稿。

作者 李金都 简介: 男, 1964 年生, 博士, 1982 年毕业于河海大学工程地质及水文地质专业, 现为教授级高工, 主要从事地质灾害预报及防治方面的科研和生产工作。E-mail: Lijindu@163.net。

率;  $E_x$  为地面上测定的电场强度;  $H_y$  为磁场强度。

又根据电磁波的趋肤效应理论, 导出了趋肤深度公式:

$$H \approx 256 \sqrt{\frac{\rho}{\beta}} \quad (2)$$

式中:  $H$  为探测深度,  $\rho$  为电阻率,  $\beta$  为频率。

从式(2)可见, 当地表电阻率固定时, 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, 达到探测的目的。

20 世纪 80 年代末, 加拿大凤凰公司根据这一理论研究制造了 CSAMT 的测量仪器并在全球推广应用。测量系统包括一套发射系统和接收系统数据处理软件系统。CSAMT 法使用可控制的人工场源, 测量参数为电场强度与磁场强度之比而得出的卡尼亚电阻率; 同时, 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。因此, CSAMT 法在工作中具有如下优点: 工作效率高, 一次发射可以同时接收 7 道电场强度和一道磁场强度; 抗干扰能力强; 勘探深度范围大, 一般可达 1 000~2 000 m; 横向分辨率高, 可灵敏地发现断层; 高阻屏蔽作用小, 可穿透高阻层。

尽管如此, CSAMT 方法也存在 2 个缺点: 静态效应, 地表电性不均匀会影响到深部的测量结果; 近场效应。这 2 个缺点, 目前已有办法进行克服, 如通过近场校正软件, 对近场数据进行校正等。

## 2 CSAMT 工作方法

### 2.1 观测区域及测试参数的选择

在利用 CSAMT 进行野外探测时, 总是把观测区域布置在一个梯形面积内, 梯形的上底为发射偶极所在的位置, 测线到发射偶极的距离应大于 3 倍的趋肤深度。测线的长度, 应保持在梯形面积之内。根据电磁场强度的理论计算, 在梯形的边部, 场强度明显变弱, 为此, 根据野外的实践经验, 最好把测区布置在一个以发射偶极为边的矩形面积之内, 这样就可以保证观测精度。

CSAMT 法因场源采用人工场, 所以在采集数据时, 既存在因收发距  $r$  太小, 使观测区过早进入近区的问题; 又存在因距离  $r$  太大, 使信噪比太低, 难以保证观测精度的问题。探测中如何协调二者关系显得十分必要。根据上述理论公式推导以及结合

野外工作经验, 认为  $r$  应满足以下 2 个条件:

$$r \geq (3 \sim 6)H$$

$$r_{\max} = [I l \rho \sin(\theta / \pi) E_{\min}] \quad (3)$$

式中:  $I$  为发射电流;  $l$  为供电偶极长度;  $\theta$  为  $r$  与发射偶极之间的夹角;  $E_{\min}$  为接收机能观测到的最小信号, 一般取  $7 \mu\text{V}$ , 其他符号及含义同前。

在布置探测工作之前, 需要大致地估计探测目标的深度和测区的电阻率值, 再根据发射功率的大小计算收发距  $r$  的大小。

发射偶极及接收偶极的大小, 主要考虑要满足偶极子的条件, 即其长度  $l_{\text{发}}$  与  $l_{\text{收}}$  相对于  $r$  要足够小。通常取  $l_{\text{发}} \leq (1/3 \sim 1/5)r$ ,  $l_{\text{收}} \leq r$  即可。另外还须考虑,  $l_{\text{发}}$  大时, 低频特性好,  $l_{\text{发}}$  小时, 高频特性好。故在探测较深的地质目标时,  $l_{\text{发}}$  可选择大一些; 在探测较浅层的地质体目标时,  $l_{\text{发}}$  可选择小一些。

对接收偶极来说,  $l_{\text{收}}$  过大其分辨率会降低, 但测量到的电位差值大, 易于观测, 工作效率高, 一个排列覆盖的范围大;  $l_{\text{收}}$  变小, 其分辨率会提高, 但测到的电位差值变小, 不能保证观测质量; 另外, 因一个排列所覆盖的范围变小, 可导致工作效率变低。当然, 如果是探测深部的具有一定规模的地质目标,  $l_{\text{收}}$  应选择较大值; 如果是探测较浅部的分布范围有限的地质目标,  $l_{\text{收}}$  应选择较小值。

发射偶极的布设, 除了考虑上述的基本原则以外, 尽量选择交通方便的地方, 如顺路、顺山沟、地形较平坦的地方。

### 2.2 提高探测质量的措施

供电时尽量采用低压大电流。在发射功率一定的条件下, 采用低压大电流的供电方式, 可最大限度地提高发射系统的效能。因为观测的电磁场值的大小与供电电流  $I$  成正比, 即  $I$  越大,  $E_x$ ,  $H_y$  值亦越大, 易于观测。但是要增大供电电流  $I$ , 不应该靠提高电压来实现, 因为这会损失发射系统的功率, 而应该尽量减小接地电阻和导线电阻, 以保证在低压下能供出大电流。为此, 发射偶极的布设是关键, 在发射偶极处, 应挖成放射状的深沟, 在深沟内埋设铝箔, 并浇上盐水或肥皂(洗衣粉)水, 填土压实, 这样可大大减小接地电阻。另外供电导线应尽量选择 10~20 芯的全铜线, 保证 1 000 m 的导线, 其电阻不超过  $5 \Omega$  为好。

接收偶极应尽量采用不极化电极, 尤其在低频段, 可减小直流漂移或电极不稳造成的干扰。如果野外没有不极化电极, 或在岩石裸露的山区, 不便

埋设不极化电极的区域,采用紫铜棒电极。测量接收偶极接地电阻越小越好,因为目前设计的仪器,输入阻抗不够高,接收偶极接地电阻太大,容易接收到干扰信号。为此,在干燥区,对接收偶极浇水是个好的方法,保证接地电阻小于 $5\text{ k}\Omega$ 为好。磁探头应使其方向与接收偶极垂直,另外要保证磁探头水平放置。在布置磁探头时,最好将一只罗盘放在磁探头上,一方面保证磁探头的水平,另一方面保证磁探头的方向与电场方向垂直。在目前 CSAMT 测量中,测 7 道电场和 1 道磁场,这 7 道电场都要与这一道磁场相比较而求得视电阻率,所以磁场的观测精度是至关重要的。磁探头应避免放在高压线下及汽车来往频繁的公路旁。

为了增加信号强度,在海拔 4 000 m 以上的青藏高原,采用了中功率发射系统,发射机为加拿大凤凰公司的 IPT-1,功率 3 kW,发射电流 1~5 A 不等;接收机采用 TURBOV-4, V-5 系统。发射与接收之间的距离都大于 5 000 m,这样就保证了探测深度不小于 1 000 m。

仪器的放大倍数设置成自动增益,根据接收到的电磁场信号的大小,自动进行增益调整。众所周知,观测精度与重复观测次数的平方根成正比,为此把迭加次数设置成 8 次。即每个频点上仪器都要自动地采样 8 次,并自动剔除突出的干扰,进行平均,最后给出的是 8 次迭加的平均值及相对误差。在野外探测中,进行质量检查,重复观测,根据物探工作的野外质量要求,必须有一定的质量检查工作,以说明其观测质量是可行的,其重复观测的数量不得少于总工作量的 5%。

## 2.3 室内工作方法

### 2.3.1 近场校正

由于 CSAMT 方法本身的原因,发射源总是在有限的距离以内,造成了接收机在接收不同频率电磁波时,其高频段处于远区,电阻率值一般不发生畸变,但其低频段处于近场区,电阻率值将发生明显的畸变。主要表现为当低于某一频率段,在断面图上电阻率等值线表现为平行线。为了克服这一现象,可通过计算机,运用近场校正软件对原始数据进行近场校正。

### 2.3.2 静态改正

由于地表存在较大的电性差异而产生强烈的静态效应,这种静态效应在电阻率断面图上常表现为一条垂直的电阻率密集带,通过空间滤波的手段,

在计算机上进行改正是一种有效的方法。

### 2.3.3 联合反演

从接收机所采集到的原始数据,只是一系列的视电阻率,不能代表地下的真实电性特征,必须进行有效的数据反演工作。采用从美国引进的剖面联合反演软件,对所测数据进行反演。

### 2.3.4 切片处理

为了追索断层的走向,给出不同深度的电性平面图,以使地球物理资料的解释进一步深化,为此作了两种切片图:一种是不同深度的切片图;另一种是利用 CSAMT 静态改正过的数据,作出不同深度不同频率时的切片图。

## 3 活动断裂 CSAMT 方法探测实例

### 3.1 工程概况

南水北调西线工程<sup>[5~7]</sup>,选择长江上游干流通天河、一级支流雅砻江、大渡河为调水河流,通过在河流建坝壅高水位,于库区左岸开凿引水隧洞穿越长江、黄河分水岭巴颜喀拉山以自流或抽水方式输水到黄河上游。3 条调水河段与黄河上游河段形成调水工程区,调水工程区位于青藏高原东南部,东起松潘草地,西至楚玛尔河口,南临川西高原,北抵阿尼玛卿上,面积近  $30\times 10^4\text{ km}^2$ ,位于青海省玉树、果洛与四川省甘孜、阿坝 4 个藏族自治州所在地区以及甘肃省甘南藏族自治州的部分地区<sup>[7]</sup>。

### 3.2 桑日麻活动断裂概况

桑日麻断裂  $F_8$  是区域内一条走向 NW 的大断裂。它西北起自昆仑山口,向南东经雅拉达泽山南坡、野牛沟、桑日玛,到达日县莫坝、达卡,延伸到壤塘县南木达及马尔康以远,在马尔康以南方向出西线调水区。该断裂由卡日曲断裂、野牛沟断裂(北段)、江基贡玛断裂(中段)、杜柯河断裂和马尔康断裂(南段)等<sup>[8]</sup>数条 NW 向断裂组成。

桑日麻断裂  $F_8$  全长 500 多公里,按区域位置大致来划分,西北段长 320 km,中部段长 30 km,东南段长 150 km,走向基本沿  $310^\circ\sim 320^\circ$  至  $130^\circ\sim 150^\circ$  方向延伸,贯穿整个西线调水区。其倾向为北东,倾角较陡,地表露头观察倾角达  $65^\circ\sim 85^\circ$ ,属于逆压性断层<sup>[8,9]</sup>。

桑日麻断裂  $F_8$  引起人们关注的两个主要原因在于:位于该断裂中段的江基贡玛断裂 1947 年发生过 7.75 级达日地震,属于全新世活动断裂,此次地

震形成 60 km 长的地表破裂带；位于该断裂南段的马尔康断裂 1989 年也发生了 6.6 级金川地震。另外，通天河调水线路、雅砻江调水线路、大渡河调水线路均要涉及穿越桑日麻断裂问题。因此，桑日麻断裂是南水北调西线工程区内的一条重要断裂，对桑日麻断裂分段并进行深入研究显得非常重要<sup>[8~11]</sup>。由于南水北调西线调水主要采用深埋长隧洞的方式引水入黄，所以，为了确定隧洞穿越活动断裂的设计方案，必须对活动断裂的深部特征进行研究。对于发育深度近千米的区域性活动断裂，工程钻探已无能为力，因此，必需采用新的探测技术解决工程设计所关心的问题。

### 3.3 活动断裂 CSAMT 方法探测结果

在桑日麻断裂展布的中段江基贡玛地区和南段的杜柯河地区，分别采用 CSAMT 方法进行探测。

江基贡玛附近的 CSAMT 探测点选在了青海省达日县莫坝乡，作了主线 CSAMT-II(610N)，主线长 700 m；在主线的 SE 方向，相距 600 m，平行于主线作了付线 CSAMT-I(10N)，付线长 420 m。

图 1 为联合反演图。从联合反演图分析，在 500~600 点号之间有一深蓝色低阻带，可推断为断层，断层向 NE 方向倾斜，倾角约 70°，断层宽度 50~80 m，上窄下宽。电阻率值由上向下逐渐降低，说明上部为风化碎屑物，砾石成分高，深部泥质成分增加，整体上看赋水量稍大。从不同频率立体切片图(图 2)分析，更可看出断层的细节及向下延伸情况。从不同频率立体切片图可发现断层从上到下的变化情况，4 个切片深度分别代表地下约 248, 350, 495 和 701 m 的电阻率分布。

对莫坝乡还另作了一条主剖面，长 1 400 m。从该点  $\rho_s$  图分析，此断面上有 4 处异常，分别位于点号 5150, 5390, 5630 及 5900 附近，其中点号 5150, 5390 附近的异常狭窄，成直立长条状，点号 5630 异常宽约 80 m，点号 5900 异常宽达 150 m 左右。其中点号 5390 号处异常可能是地表深河沟引起。

从滤波图上，也可看出在点号 5850~5910 处有明显的基岩断层，其他几个异常也都明显。从反演图上可看出在点号 5850 处有一基岩异常存在。点号 5150 和 5390 处的异常依然存在，但成尖狭窄状。点号 5800~5910 处有一直通基底的低阻带，点号 5390, 5630 处也出现 2 条形状不规则的异常。

综上所述，推测桑日玛断层探测处宽约 100 m，延深达 1 000 m，断层处电阻率较高，为 300~500  $\Omega \cdot m$ ，深部降为 100  $\Omega \cdot m$ ，可见断层充水不好。点号 5630 和 5150 处也发现一分支断层。探测结果见表 1。

根据 CSAMT 探测结果，在探测部位专门布置了一个深度为 305 m 的钻孔进行了验证。验证结果显示，勘探部位确实为一断层破碎带，并且断层破碎带还会向下延伸相当的深度。

根据 CSAMT 探测结果，在探测部位专门布置了一个深度为 305 m 的钻孔进行了验证。验证结果显示，勘探部位确实为一断层破碎带，并且断层破碎带还会向下延伸相当的深度。

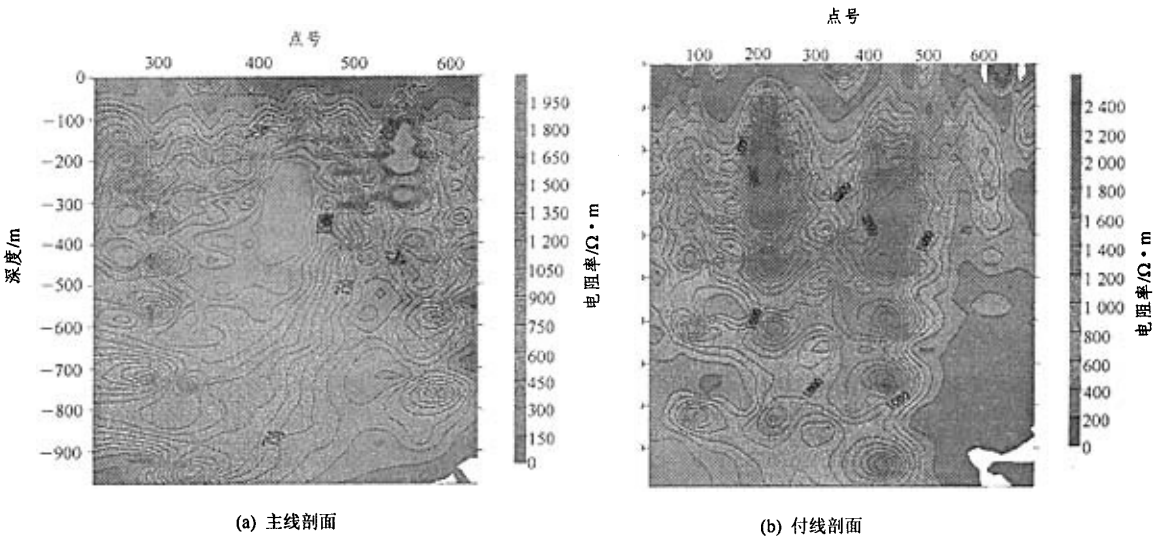


图 1 联合反演剖面图  
Fig.1 Section plots of combined inversion

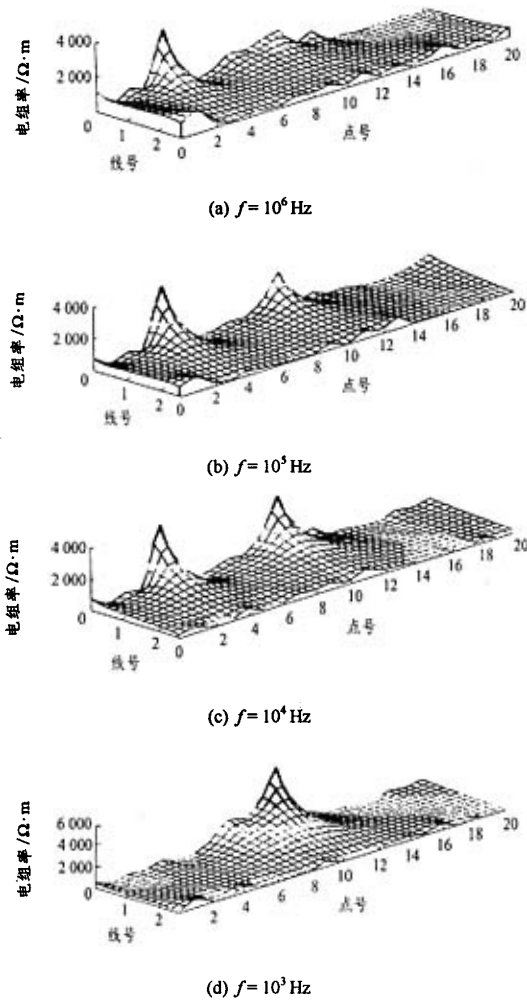


图2 不同频率立体切片图

Fig.2 Three-dimensional section plots with different frequencies

表1 江基贡玛附近 CSAMT 法断层探测结果

Table 1 Prospecting results of Jiangjigongma fault by CSAMT

断层中心位置	断层宽度/m	断层倾角/(°)	断层向下延深深度/m	断层走向/(°)	断层性质(充水情况)
主线点号 530 付线点号 510	约 80	70	>1000	320	砂板岩碎块及粘土泥质板岩充填, 水量偏多
点号 5850	约 100	80	约 1 000	不详	充水性差

杜柯河 CSAMT 探测点选在了四川省壤塘县和青海省班玛县结合部, 位于南水北调西线一期工程

区调水线路内的易郎沟。探测深度 600 m, 探测结果显示, 该断层平面位置上位于距易郎沟沟头 2 100 m 处, 宽度达 200 m, 异常表现为低电阻率条带由地表向下延伸, 断层倾角高陡, 向下延伸大于 700 m。为证实 CSAMT 探测结论, 在 CSAMT 探测点断带内进行了测氦工作, 测氦值均大于 40 CPS, 最大可达 574 CPS, 证明了断层的存在。

### 4 结 论

由于活动断裂往往无论是在平面展布上还是深部发育延深上都是大规模的, 这种特点给地质勘探提出了更高和更难的要求。利用 CSAMT 技术可以探测活动断裂在不同深部的发育特征。经过钻探等勘察方法的验证, CSAMT 探测结果有较高的准确性, 值得在南水北调西线工程的断裂研究中进一步推广应用<sup>[10, 11]</sup>。

CSAMT 技术是一项物探新技术, 可用于探测断层深部的发育情况, 为分析工程地质问题提供基础性资料, 可以很好地指导钻探等勘察手段的野外工作布置, 具有很好的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 李兴唐. 活动断裂研究与工程评价[M]. 北京: 地质出版社, 1991
- 2 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, 2~12
- 3 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(2): 30~35
- 4 吴璐莘, 石昆法. 松山地下热水勘探及成因模式探讨[J]. 物探与化探, 1996, 20(3): 42~46
- 5 陈效国, 席家治. 南水北调西线工程与后续水源[J]. 人民黄河, 1999, 21(2): 16~18
- 6 李国英. 论黄河的长治久安[J]. 人民黄河, 2001, 23(7): 1~5
- 7 谈英武, 刘 新. 南水北调西线工程进展情况[J]. 人民黄河, 1999, 21(2): 19~21
- 8 王学潮, 张 辉. 南水北调西线工程地质灾害初步分析研究[J]. 地球科学, 2001, 26(3): 297~303
- 9 王学潮, 马国彦. 南水北调西线工程及其主要工程地质问题[J]. 工程地质学报, 2002, 10(1): 38~45
- 10 李金都, 陈书涛. 南水北调西线调水区地质条件关键工程地质问题分析[J]. 人民黄河, 1999, 21(2): 22~24
- 11 李金都. 南水北调西线调水区温泉成因及对地下工程的影响分析[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(9): 477~480