

文章编号: 1006 - 2106( 2011) 12 - 0011 - 04

# 天然源大地电磁法在构造勘察中的应用研究\*

祁晓雨\*\* 许广春 李志华

( 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300251)

**摘要:** 研究目的: 近年来, 随着铁路的建设, 铁路线位深入到丘陵山区的情况越来越多, 在铁路断层构造勘察中, 传统物探方法的局限性越来越明显。针对断层构造勘察, 对天然源( 音频) 大地电磁法( AMT) 的处理和解释等方面进行深入的研究, 目的是提高物探对断层构造勘察的精度及使断层构造勘察基本不受限制。

**研究结论:** ( 1) 在铁路断层构造勘察中, 天然源( 音频) 大地电磁法( AMT) 与传统物探方法相比, 具有受地形影响小, 快捷, 勘探深度大, 成本低等优势; ( 2) 自主研发的数据处理方法, 将天然源( 音频) 大地电磁法( AMT) 与人工源( 可控源音频) 大地电磁法( CSAMT) 使用同一平台进行数据处理, 解决了以往存在反演过于平滑, 异常均一化的缺陷, 断层构造勘察效果更加明显, 查明了断层构造分布格局; ( 3) 为对铁路选线提供了有力的依据, 对类似情况的铁路断层构造勘察具有很强的指导意义。

**关键词:** 天然源( 音频) 大地电磁法; 断层构造; 数据处理; 选线

中图分类号: U212. 2 文献标识码: A

## Research on Application of Natural Source Audio Frequency Magnetotellurics in Structure Exploration

QI Xiao - yu , XU Guang - chun , LI Zhi - hua

( The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation , Tianjin 300251 , China)

**Abstract: Research purposes:** With the rapid railway construction , more and more railway lines pass through the hill and mountain areas in recent years. the limitations of the conventional geophysical methods are more and more obvious when they are used for the fault structure exploration for railway. The research is done on the data processing and interpretation of the natural source audio frequency magnetotellurics for the fault structure exploration for the purpose of improving the accuracy of fault structure survey and basically having no limitation in the fault structure survey.

**Research conclusions:** In the fault structure exploration for railway , compared with the conventional geophysical methods , the natural source audio frequency magnetotellurics has the features of the rapid survey with less topographical limitation , big survey depth and low cost. With the self - developed data processing methods , the same platform can be used for processing the data of the natural source audio frequency magnetotellurics and CSAMT to solve the defect that the inversion is too smooth and abnormal homogenization , getting good survey effect on the fault structure exploration and finding out the distribution pattern of fault structure. It provides a strong basis for the railway alignment and guiding significance to the similar works.

**Key words:** natural source audio frequency magnetotellurics; fault structure; data processing; alignment

在铁路断层构造勘察中, 最常用传统物探方法是直流电测深法、地震折射和反射波法, 近年来, 随着铁

路的建设, 铁路线位深入到丘陵山区的情况越来越多, 传统物探方法的局限性越来越明显。具体体现在: 一

\* 收稿日期: 2011 - 08 - 15

\*\* 作者简介: 祁晓雨, 1983 年出生, 男, 助理工程师。

是受地形限制较大,一般断层构造勘察都在地形较为平缓、地层缓倾、岩性相对均匀的地区进行;二是断层构造勘察物探是首选,而采用其它手段又难以替代,但传统的方法技术不能满足断层构造勘察的需要;三是受地形影响,成果中存在相当因素的地形影响,且难以消除,成果可靠性差;四是断层构造向下延伸,如提高断层构造勘察精度,勘察的深度一般应大于 300 m,但是传统的方法勘察深度有限,难以实现;五是采用传统的方法进行断层构造勘察生产效率低、勘探成本高,不能满足勘察周期的需要,时效性差。特别在地形、地质复杂的地区,地表覆盖、植被茂密和地表地质条件下,很难查清并容易遗漏对工程有影响的断层构造,急需采用地面施测物探解决断层构造勘察的地质问题。

现阶段随着物探仪器设备和电子数字技术的发展,给物探进行断层构造勘察解决工程地质问题提供了可能。天然源(音频)大地电磁法(AMT)是一种新的高精度的地球物理探测技术,受地形影响小、探测深度大;能在地形复杂的丘陵山区进行施工;采集的频点相对于人工源大地电磁丰富。理论上讲就可以提高浅层的分辨率及提高深层的反演精度。本文主要针对天然源(音频)大地电磁(AMT)的数据采集、处理和解释等方面进行了深入系统研究,目的是提高物探资料对断层构造勘察的分辨率和探测精度,基本突破地面施测断层构造勘察的瓶颈,满足铁路地质断层构造勘察的需要。

## 1 方法原理

天然源(音频)大地电磁法(AMT)的原理与传统的大地电磁(MT)法一样。天然源(音频)大地电磁法(AMT)具有很宽的频率范围,它主要由太阳风与地球磁层、电流层之间复杂的相互作用,以及雷电活动等这些地球外层空间场源引起的区域性,乃至全球性的天然交变电磁场,不同频率的电磁场相互迭加在一起,是一个非常复杂的电磁振荡。大地电磁场入射到地下时,一部分被介质吸收衰减;一部分反射到地面,它带有反映地下介质电性特征的电磁场信息。人们通过观测地表的电、磁场分量,来研究地下地质结构及其分布特征。在均匀大地和水平层状大地情况下,波阻抗是电场  $E$  和磁场  $H$  的水平分量的比值<sup>[1]</sup>。

$$Z = \left| \frac{E}{H} \right| e^{i(\varphi_E - \varphi_H)} \quad (1)$$

$$\rho_{xy} = \frac{1}{5f} |Z_{xy}|^2 = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2)$$

$$\rho_{yx} = \frac{1}{5f} |Z_{yx}|^2 = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (3)$$

式中  $f$ ——频率(Hz);

$\rho$ ——电阻率( $\Omega \cdot m$ );

$E$ ——电场强度(mV/km);

$H$ ——磁场强度(nT);

$\varphi_E$ ——电场相位(mrad);

$\varphi_H$ ——磁场相位(mrad)。

必须指出的是,此时的  $E$  与  $H$  应理解为一次场和感应场的空间张量叠加后的综合场,简称总场。在电磁理论中,把电磁场( $E$ 、 $H$ )在大地中传播时,其振幅衰减到初始值  $1/e$  时的深度,定义为趋肤深度( $\delta$ ):

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (4)$$

公式(4)为理论上的趋肤深度,根据实践,探测深度的经验公式为:

$$H \approx 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (5)$$

由式(5)可知,探测深度( $H$ )将随电阻率( $\rho$ )和频率( $f$ )的改变而改变,频率较高的数据反映浅部的电性特征,频率较低的数据反映较深的地层特征。

## 2 系统装置和布设

### 2.1 系统装置

本次断层构造勘察所采用的仪器设备为加拿大凤凰地球物理有限公司 MTU-A,采集盒子能够记录两道不极化电极测量的电道和/或两到三个利用探头测量的磁道数据。记录单元之间通过全球卫星定位系统(GPS)与世界通用协调时间(UTC)同步。

### 2.2 系统布设

野外工作是在每一个测点进行矢量测量,同时观测沿测线方向的电场、磁场和垂直测线方向电场和磁场,并且,电偶极子的长度等于点距,两个测点沿测线方向的电偶极子首尾连接<sup>[2]</sup>。

接收信号使用不极化电极,每两个测量电极组成一个电偶极子,其长度为 25 m。电极布置方式采用十字型。野外布置电极时浇灌一定量饱和盐水,保证偶极接地电阻小于 2 000  $\Omega$ 。两磁棒不放置在同一象限内,为了消除人文干扰两个磁棒要埋在地下至少 5 cm,并且距采集盒子 5 m 以上<sup>[3]</sup>,工作系统如图 1 所示。

## 3 MTU-A 数据采集及处理

### 3.1 MTU-A 数据采集

MTU-A 同时采集连续(三个)频带的时间序列数据,如图 2 所示。

对于一个测点时间序列数据,数据处理后为 40 个有效频点,频率范围为 11.2 ~ 10 400 Hz,MTU-A 输

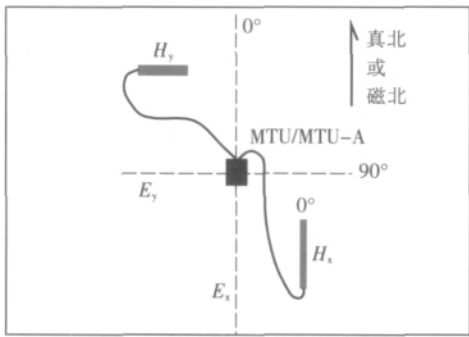


图 1 MTU - A 工作系统示意图

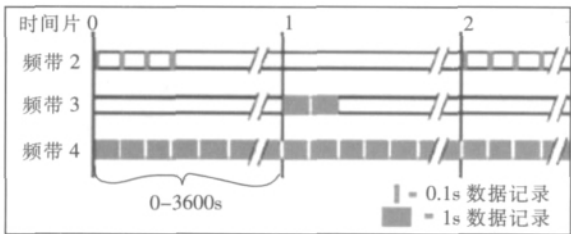


图 2 MTU - A 数据采集方式

出的频率与人工源(可控源音频)大地电磁法(CSAMT)采集的频率相比,具有采集频点密,而且不受近场效应的影响的特点,就可以消除很多静态的影响。

3.2 数据处理

而大地电磁成果的精度与采集频点的疏密有较大的关系,采集密集的频点为数据处理奠定了良好的基础;而以往的数据出来采用随仪器配属的软件进行信号处理、数据分析和编辑、一维反演和二维反演。但缺陷较多:其一,该系统数据处理时通过频点圆滑和去噪处理后往往存在根据以往总结的经验而非依据实际的地球物理特性取平滑系数;其二,数据处理的成果被普遍认为低阻的范围大,卡尼亚电阻率偏低,容易形成圈定的设计施工时应注意异常数量多、异常扩大化等容易让使用者提出异议;其三,该系统数据处理往往存在成果过于平滑、异常不明显,特别容易遗漏影响安全的异常。

根据上述所存在问题进行了有针对性的研究,为了避免依据经验取平滑系数,借鉴人工源大地电磁处理技术,通过自编软件二次开发将数据预处理的天然源大地电磁数据使用人工源大地电磁处理技术进行数据处理,将人工源和天然源大地电磁数据实现同一平台进行数据处理,彻底消除了:(1)依据经验取平滑系数,容易遗漏影响安全工程地质隐患问题;(2)电阻率偏低、低阻的范围大,圈定应注意异常数量多、扩大化;(3)成果过于平滑、异常不明显,特别容易遗漏影响安

全的异常等过去一直未能解决的难题,反演信息丰富、计算精度高,对地质体作出更为准确的判断。

4 应用实例

4.1 工区概况

福建某铁路工程断层构造勘察工作范围较广,交通不便利。区内存在较多区域断裂及地层界线,断裂走向变化较大,并且地形条件较差,属于高山、丘陵地貌,沿测线部分地段起伏较大,地形陡峻。地表被砂质黏土、中细砂等第四系所覆盖,下伏基岩有砂岩、变粒岩、花岗岩、石英片岩等,地层岩性较复杂。选择天然源(音频)大地电磁法(AMT)查明断裂的走向、倾向、宽度及对线位的影响。各断层构造以线路里程编号命名。

根据物探资料统计分析,各地层岩性在电阻率等物理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,主要地层岩性的物性参数如表 1 所示。

表 1 地层岩性物性参数

序号	岩性	视电阻率 / ( $\Omega \cdot m$ )	卡尼亚电阻率 / ( $\Omega \cdot m$ )
1	砂质黏土	40 ~ 500	< 200
2	中细砂	25 ~ 500	< 300
3	变粒岩(破碎)	< 1 000	< 1 500
4	变粒岩(完整)	> 2 000	> 3 000
5	砂岩	100 ~ 1 000	100 ~ 1 500
6	变质砂岩	> 1 000	> 2 000
7	石英片岩	1 000 ~ 2 000	1 000 ~ 3 000
8	花岗岩	> 2 000	> 3 000

4.2 分析原则

野外采集的时间序列的数据进行预处理后,对每一个测点进行编辑,舍掉畸变的频点,保留高质量的频点数据。对所有测点进行有效编辑后,结合实际有关资料分析后再对整个剖面进行 2D 处理。得到反演后的剖面电阻率色谱图。

断层构造分析原则:

(1) 在断层构造存在的地方,岩石往往破碎、风化、含水。在电阻率反演剖面上表现为电阻率等值线发生扭曲、突变,呈现低电阻率凹陷的特征。下凹的中心为断层构造的中心。

(2) 等值线出现电阻率相对高低阻明显变化处,断层的中心确定为靠近等值线相对剧烈变化处。

4.3 典型实例

4.3.1 CK 83 断层构造

该断层构造地表大部为砂质黏土、中细砂,下伏基岩为侏罗系梨山组砂砾岩,地质提供的地调成果中,有

一处断层构造。为查明断裂走向,布置两条测线,1测线在1测线的385处与CK 82+682相交,如图3(a)

所示;2测线在2测线的385处与CK 83+131相交,如图3(b)所示。

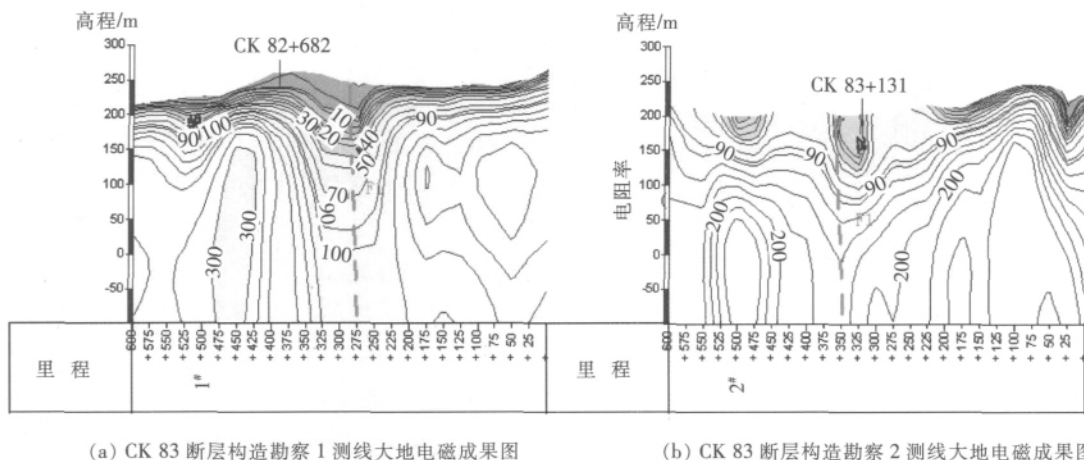


图3 CK 83 断层构造大地电磁成果图

图3(a)为CK 83 断层构造1测线大地电磁成果图,1测线的275处等值线向下弯曲,连续性被切断,存在相对低阻,推断该处存在断层,记为F1,该断层为侏罗系梨山组砂砾岩受断层构造活动挤压破碎产生。图3(b)为CK 83 断层构造2测线大地电磁成果图,2测线的350处等值线向下弯曲,连续性被切断,存在相对低阻,推断该处存在断层;推测2测线的断层与1测线的断层为同一断层,记为F1,该断层为侏罗系梨山

组砂砾岩受断层构造活动挤压破碎产生。

#### 4.3.2 CK 131 断层构造

该断层构造地表大部为砂质黏土、中细砂,下伏基岩为南华纪变质石英砂岩、变质粉砂岩,地质提供的地调成果中,有一处断层构造。根据现场地形沿线路左线CK 131+300~CK 132+000布置测线,如图4(a)所示;为查明断层走向,平行于该段布置一条旁测线,里程编号pcx,在线位右侧200m,如图4(b)所示。

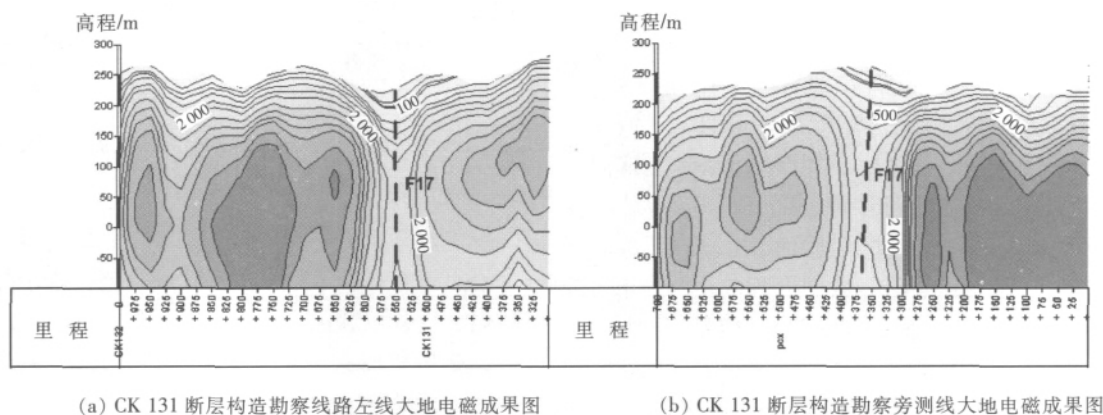


图4 CK 131 断层构造大地电磁成果图

图4(a)为CK 131 断层构造线路左线大地电磁成果图,CK 131+550处等值线向下弯曲,连续性被切断,出现相对低阻,推断该处存在断层,并与地质调绘的成果相符,统一标记为F17,该断层为南华纪变质石英砂岩、变质粉砂岩地层受断层构造活动挤压破碎产生。如图4(b)所示,在CK 131 断层构造旁测线大地电磁成果上,pcx+350处等值线向下弯曲,连续性被切断,推断该处存在断层;两测线推断的断层应为同一断层,记为F17。

## 5 结论

(1) 在铁路断层构造勘查中,天然源(音频)大地电磁法(AMT)与传统物探方法相比,具有不受地形限制,生产效率,勘探深度大,勘探成本低等优势。

(2) 自主研发的数据处理方法,将天然源(音频)大地电磁法(AMT)与人工源(可控源音频)大地电磁法(CSAMT)使用同一平台进行数据处理,彻底消除了

(下转第30页)

Railway Engineering [S].

- [4] GBJ 50111—2006 铁路工程抗震设计规范 [S].

GBJ 50111—2006 ,Code for Seismic Design of Railway Engineering [S].

- [5] 中国地震局地壳应力所. 宝中铁路增建二线新六盘山隧道水压致裂法地应力测试初步结果 [R]. 北京: 中国地震局地壳应力所 2011.

China Seismological Bureau Crust Stress Institute. New Liupan Mountain Tunnel Preliminary Ground Stress Test Results of Extended Second Line of Baoji -

Zhongwei Railway [R]. Beijing: China Seismological Bureau Crust Stress Institute 2011.

- [6] 王联平. 西南线芦山隧道地质选线 [J]. 铁道工程学报, 2001(3): 96-99.

Wang Lianping Geologic Route Selection for Lushan Tunnel of Xi'an - NangJing Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society 2001(3): 96-99.

(编辑 吕洁)

(上接第 14 页)

依据经验取平滑系数、电阻率偏低、低阻的范围大、圈定应注意异常数量多并扩大化、成果过于平滑、异常不明显 特别容易遗漏影响安全的异常等过去一直未能解决的难题,反演信息丰富、计算精度高,对地质体作出更为准确的判断。

(3) 天然源(音频)大地电磁法(AMT)在断层构造勘察中的应用是成功的,对铁路选线提供了有力的地质依据,满足了地质任务要求,并指导了钻孔的布设,基本探明了线位附近的地质断层构造等情况,对类似地区的铁路地质勘探工作具有指导意义。

## 参考文献:

- [1] 许广春,等. 可控源音频大地电磁法(CSAMT)在隧道勘察中的应用[J]. 工程勘察 2008(6): 68-71.

Xu Guangchun, etc. Application of CSAMT Method on Tunnel Exploration [J]. Geotechnical Investigation & Surveying 2008(6): 68-71.

- [2] 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(4): 1190-1195.

Li Zhihua. Geology and CSAMT character of long complex railway tunnel [J]. Progress in Geophysics, 2005(4): 1190-1195.

- [3] 李志华,朱旭东. 复杂地质隧道的综合物探技术[J]. 铁道工程学报 2008(8): 58-61.

Li Zhihua, Zhu Xudong. The Application of Integrated Geophysical Exploration Technology in the Tunnel Under the Complicated Geological Conditions [J]. Journal of Railway Engineering Society 2008(8): 58-61.

- [4] 刘黎东,张吉振. EH-4 电导率成像系统在铁路长大隧

道中的应用[J]. 铁道勘察 2007(2): 50-52.

Liu Lidong, Zhang Jizhen. Application of EH-4 Conductivity Imaging System in Long and Large Railway Tunnels [J]. Railway Investigation and Surveying, 2007(2): 50-52.

- [5] 郝明,董晨. 有源无源大地电磁在玄武岩覆盖区长大隧道发挥的作用[J]. 工程地球物理学报 2009(S1): 46-48.

Hao Ming, Dong Chen. Influence of MT With Source and without Source in Long and Big Turnners with Basalt Buried [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics 2009(S1): 46-48.

- [6] 何继善. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1989.

He Jishan. Controlled Source Acoustic Magnetotelluric [M]. Changsha: Zhongnan Industrial University Press, 1989.

- [7] 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.

Shi Kunfa. The Theory And Application Of CSAMT [M]. Beijing: Science press, 1999.

- [8] 王家映. 地球物理反演理论[M]. 北京: 高等教育出版社 2002.

Wang Jiaying. Invers Theory in Geophysics [M]. Beijing: Higher Education Publications Inc 2002.

- [9] 底青云,王若. 可控源音频大地电磁数据正反演及方法应用[M]. 北京: 科学出版社 2008.

Di Qingyun, Wang Ru. Controlled Source Auodio - freequency Magneto Tellurics [M]. Beijing: Scientific Publications Inc 2008.

(编辑 曹淑荣)