

文章编号: 1674—8247(2023)01—0097—05

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2023.01.018

## 西渝高速铁路沿线断层大地电磁勘探研究

周超 赵思为 赵文龙 方力

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**本文介绍了音频大地电磁测深法(AMT)的原理以及常用的4种AMT仪器的性能和特点,阐述了AMT野外和室内的工作方法,以西渝高速铁路的复杂地质地形条件为背景,采用4种AMT仪器对不同地质条件下的断层进行勘探,验证了AMT法在复杂地质地形条件的断层勘探上的有效性;通过分析4种仪器对于断层勘探的电阻率反映的区别,总结了4种AMT仪器在断层勘探中的特点。研究成果为类似铁路隧道物探断层勘探工作提供了参考。

**关键词:**西渝高速铁路;音频大地电法;断层破碎带;铁路隧道

中图分类号: U452.1 文献标识码: A

## A Study on Magnetotelluric Prospecting for Faults along Xi'an-Chongqing High-speed Railway

ZHOU Chao ZHAO Siwei ZHAO Wenlong FANG Li

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** This paper introduces the principle of audio magnetotellurics (AMT) and the performance and characteristics of four commonly used AMT instruments, expounds on the field and office working methods of AMT. Then, taking Xi'an-Chongqing High-speed Railway with complex geological and topographic conditions as a case, four AMT instruments were used to explore faults under different geological conditions, to verify the validity of the AMT method in fault prospecting under complex geological and topographical conditions. By analyzing the difference between the four AMT instruments in the resistivity reflection of fault prospecting, their characteristics in fault prospecting were summarized. The results provide a reference for prospecting the geophysical fault of similar railway tunnels.

**Key words:** Xi'an-Chongqing High-speed Railway; audio magnetotelluric method; fault fracture zone; railway tunnel

西渝高速铁路是西部高速铁路建设的一个重要项目。铁路全线经过大巴山地区和川东平行岭谷地区,大巴山地区地质条件复杂,构造褶皱紧密,断层发育,多座隧道穿越断层破碎带,甚至出现了不到10 km穿越8条断层破碎带的隧道。断层破碎带破坏了岩体的连续性和完整性,对隧道施工带来了安全隐患,严重影响隧道的稳定性。

经过多年的发展,断层探测方法日益增多且成熟,音频大地电磁法<sup>[1]</sup>、等值反磁通瞬变电磁法<sup>[2]</sup>、高密度电法<sup>[3]</sup>、浅层地震波反射法<sup>[4]</sup>等在断层探测领域都取得较好的效果。然而,浅层地震波反射法受地形影响较大,在地形条件复杂的山区并不适应;等值反磁通瞬变电磁法和高密度电法适应于埋深较浅且地形条件较好的断层探测工作;大巴山地区河流切割强

收稿日期: 2021-10-12

作者简介: 周超(1990-),男,工程师。

引文格式: 周超,赵思为,赵文龙,等. 西渝高速铁路沿线断层大地电磁勘探研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(1): 97-101.

ZHOU Chao, ZHAO Siwei, ZHAO Wenlong, et al. A Study on Magnetotelluric Prospecting for Faults along Xi'an-Chongqing High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(1): 97-101.

烈,多峡谷,山谷高差达 800~1 200 m,地形崎岖,隧道埋深较大,以上 3 种方法均不能满足该地区的断层探测工作。

音频大地电磁 AMT(Audio-frequency Magnetotelluric)法于上世纪中叶被提出,经过 60 年的发展,AMT 法在观测精度、抗干扰能力、数据处理以及解释软件都有了很大的提高,目前已广泛应用于工程勘察和金属矿勘探,均取得良好的应用效果。同时,AMT 法也被用于铁路工程深埋隧道的物探工作中,在满足勘探深度的同时,AMT 法探测结果对地层、构造、岩溶等地质现象的反应较为齐全和准确,在野外受地形影响较小,尤其在断层探测中取得较好的效果,能够较准确地查明断层的平面位置和影响范围<sup>[5-7]</sup>。

本文首先简述了 AMT 法的原理和特点,介绍了目前常用的 4 种 AMT 仪器及其性能,以西渝高速铁路大巴山地区为背景,验证了 AMT 法在复杂地质条件和地形条件下查明断层情况的能力,通过分析 4 种仪器对于断层勘探的电阻率反映的区别,总结了 4 种 AMT 法仪器在断层勘探上的特点。

## 1 AMT 法原理及仪器设备

### 1.1 方法原理

AMT 法是在 20 世纪 50 年代初期提出的一种较新的地球物理探测方法,其理论基础源于卡尼亚大地电磁理论。当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,反射地面部分带有反映地下介质电性特征的电磁场信息。通过观测地面上的电、磁场分量,可得到视电阻率(或相位)-频率曲线。由视电阻率-频率曲线通过一定的反演方法可获取地下不同深度的电阻率分布。铁路工程物探主要目的是探测数公里范围以内的地质情况,选用的频率一般在 0.25~10 000 Hz 范围内,这一频段大体在人耳可接受的音频范围内,所以将这一频段内的大地电磁测深法叫做作音频大地电磁法(AMT)勘探,AMT 法最基本的公式为:

$$\rho = \frac{1}{\omega \mu} |Z|^2 = 0.2T \left| \frac{E}{H} \right|^2 \tag{1}$$

式中:  $\rho$ ——电阻率;  
 $\omega$ ——角频率,  $\omega = 2\pi/T$ ;  
 $\mu$ ——磁导率;  
 $Z$ ——波阻抗;  
 $E$ ——电场(mV/km);  
 $H$ ——磁场( $\gamma$ )。

AMT 法具有如下特点:(1)利用天然场源,无近场

效应影响;(2)仪器轻便,适用于地形条件复杂的山区地带;(3)AMT 法是张量或矢量测量,对二维构造反映较逼真,采用 TM 和 TE 两种模式观测,能较真实的反映地质规律。

### 1.2 仪器设备

随着 AMT 法在国内外的广泛应用和近代电子技术和计算机技术的不断发展,世界上涌现出各式各样的 AMT 观测系统。目前国内应用较广泛的主要有 EH4、V8、ADU-07e 和 Aether 观测系统,其中 EH4 和 V8 较早的被应用于国内铁路物探工作中,是目前应用最广泛的 2 套 AMT 法观测系统,ADU-07e 观测系统在铁路隧道物探工作中较少见,而 Aether 系统则是近几年才被引进到铁路物探工作中。各仪器的性能及特点如表 1 所示。

表 1 大地电磁法仪器设备性能和特点表

设备名称	EH4系统	V8系统	ADU-07e系统	Aether系统
生产厂家	美国 EMI 和 Geometrics	加拿大凤凰	德国 Metronix	美国 CG
频率范围	10~100 kHz	5~10 kHz	直流~250 kHz	1~256 kHz
可用方法	AMT	MT、AMT、CSAMT	MT、AMT、CSAMT	MT、AMT、CSAMT

## 2 AMT 法工作方法

### 2.1 野外数据采集

铁路隧道物探工作中应先收集工区的地形地貌资料、地质资料、钻孔资料和岩石物性资料等,对收集到的资料进行分析确定工区是否具备开展 AMT 法的地电条件。

铁路隧道 AMT 法探测的测线一般都是沿着隧道中线布置,测点点距一般选择为 20 m,在构造复杂地区可适当加密。在正式开展工作之前需对仪器设备进行平行试验,以检查仪器设备是否能正常工作。

AMT 法野外工作时的布置示意如图 1 所示,野外装置布置时,需注意以下 3 点:(1)X 方向的电极与 Y 方向的电极须相互垂直,在布置过程需用罗盘定向,误差不超过  $\pm 1^\circ$ ,电极的长度需用测绳测量,误差应小于 0.5 m;(2)磁棒距离前置放大器应大于 5 m,且应将两个磁棒埋在地下,同样适用罗盘定向使两根磁棒相互垂直且保持水平,误差同样不超过  $\pm 1^\circ$ ,现场人员应远离磁棒至少 5 m,且尽量远离房屋、电线等地方布置磁棒;(3)主机放置位置应距离前置放大器不少于 5 m。野外采集工作时必须保证采集得到的资料包含足够的频率成分和记录长度,且满足一定的质量

要求,在遇到电磁干扰时应适当调整测点位置以获得更高质量的观测数据,最后还应对资料进行自评。

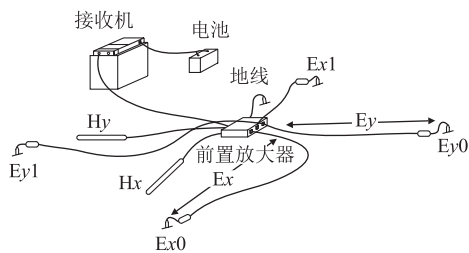


图 1 AMT 法野外装置布置示意图

2.2 室内数据处理

在室内数据处理中,不同的探测仪器对资料的处理会使用到不同的处理软件,本次数据处理采用的处理软件主要为 MTPioneer、winglink 和 5DEM - EH4。不同处理软件的处理流程大致相同:首先对原始资料进行剔除非值、去噪等处理,随后进行一维及二维反演成像,生成 TE 和 TM 模式的反演电阻率断面图。资料处理流程如图 2 所示。

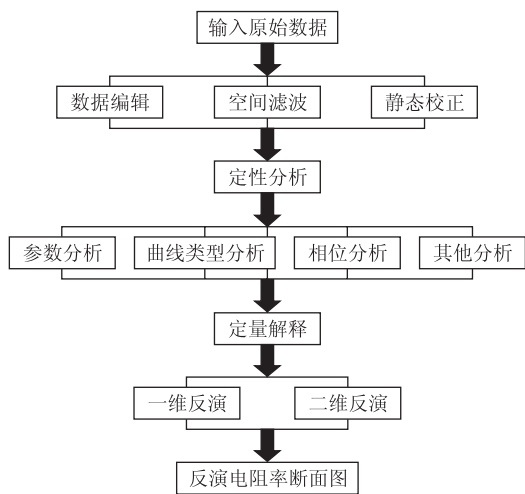


图 2 AMT 法资料处理流程图

3 断层探测实例

工区位于大巴山地区,海拔 600 ~ 2 400 m,相对高差 300 ~ 1 500 m,属中、低山地貌。受地质构造影响,该区山脉走向大致沿北西向弧形展布。该区多属强烈切割之中高山地形,巍峨险峻,山高谷深,山坡陡峻,河谷狭窄,山脊一般狭长平缓,起伏相对较小,局部有陡峭孤峰。本次探测工作使用了 4 种不同的 AMT 法探测仪器,分别为 EH4、ADU-07e、V8 和 Aether。

3.1 EH4 系统探测

测区位于大巴山南部边缘,地形起伏较小,地层

岩性简单,主要为侏罗系中统新田沟组(J2x)和下沙溪庙组(J2xs)泥岩夹砂岩,电阻率 10 ~ 1 200  $\Omega \cdot m$ 。根据前期地质调查主要构造为七里峡背斜,在背斜的西翼发育 F5 断层,隧道洞身在 DK 215 + 040 附近穿越此断层。此次任务是查明 F5 断层的确切位置及破碎带宽度。

EH4 电磁系统的野外采集数据经过处理后得出电阻率断面如图 3 所示,纵横方向分别代表高程和里程位置。由图 3 可知,纵向上视电阻率从上到下逐步递增,横向上高低阻相间,浅部的低阻带为覆盖土层或全风化岩石的电性反应。在隧道线路洞身位置 DK 215 + 015 ~ + 068 段有一个电阻率值明显小于两侧背景电阻率的向下贯通的条带状低阻异常,结合地质调查资料,可以判定该低阻异常为 F1 断层。

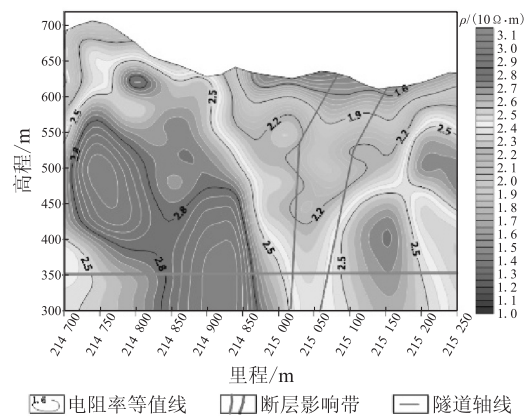


图 3 AMT 二维反演解释结果图(EH4)

在 DK 215 + 050 处进行钻探验证,岩芯破碎,出现大量构造断裂岩,如图 4 所示,由此验证了 DK 215 + 015 ~ + 068 段为 F5 断层。

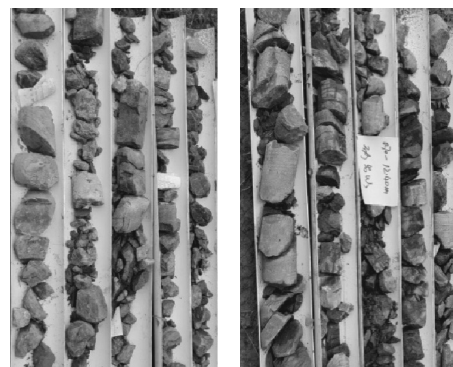


图 4 钻孔岩芯图(DK 215 + 050)

3.2 ADU-07e 系统探测

测区位于大巴山南部边缘与川东岭谷低山丘陵交界区,根据前期地质调绘资料,隧道洞身在



DK 245 + 450 穿越 F1 断层, 该断层为正断层, 断层破碎带宽度不明, 上下盘岩性均为侏罗系中 - 下统自流井组(J1-2z)粉砂岩夹泥岩、页岩、灰岩, 电阻率 1 ~ 1 500  $\Omega \cdot \text{m}$ , 与隧道夹角为 89°, 对隧道工程后期施工影响较大, 此次任务是查明 F1 断层的破碎带宽度。

野外数据采集使用的是 ADU-07e 电磁采集系统, 采用专用软件进行数据处理得出电阻率断面图, 如图 5 所示。由图 5 可知, 该段电阻率以中高阻为背景, 浅部的低阻带为覆盖土层或全风化岩石的电性反应。在 DK 245 + 440 ~ + 510 段有一个向下贯通的条带状低阻异常, 电阻率值小于 100  $\Omega \cdot \text{m}$ 。综合反演电阻率断面图中的背景值、低阻异常形态以及梯度值等因素, 可判定为断层破碎带的电性反应, 宽度大约为 80 m, 结合前期地质资料, 判定该低阻异常为 F1 断层。

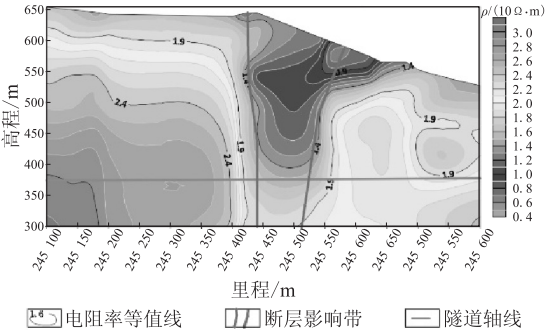


图 5 AMT 二维反演解释结果图(ADU-07 e)

在 DK 245 + 480 处进行钻探验证, 岩芯中发现大量的构造碎裂岩, 断裂面、擦痕发育, 从而证实 DK 245 + 440 ~ + 510 段为 F1 断层位置。

3.3 V8系统探测

测区位于渝陕交界强烈切割的大巴山山岳地带, 地形起伏大, 河流切割强烈, 沟谷多成“V”字型, 沟谷两侧地形陡峭, 斜坡坡度一般在 45° 以上, 并多呈陡崖状。主体山脉走向为北西 ~ 南东向, 与岩层走向及构造走向基本一致, 形成条状山脉。地层岩性为寒武系下统黑水河组( $\epsilon 3h$ )灰岩。根据前期地质调查, 测区内发育了 3 个断层, 分别为三元沟断层、周家坪断层和桃树坪断层。3 个断层破碎带宽度不明, 三元沟断层与隧道洞身相交于 DK 76 + 140 附近, 周家坪断层与隧道洞身相交于 DK 76 + 690 附近, 桃树坪断层与隧道洞身相较于 DK 77 + 300 附近。3 个断层岩体都破碎 ~ 极破碎, 可能富水或形成集气通道, 对隧道工程影响较大。

使用 V8 电磁采集系统进行野外采集数据, 将原始数据进行剔除非值、去噪等预处理, 然后将预处理的数据经过地形校正后进行二维反演得到电阻率断

面图, 如图 6 所示, 纵横方向分别代表高程和里程位置。由图 6 可知, 该段电阻率以中高阻为背景, 存在相较于背景值电阻率偏低的 3 个低阻异常带, 其中大里程端的 2 个低阻带的位置与前期地质调查的周家坪断层和桃树坪断层较吻合, 将这 2 个低阻异常带判释为周家坪断层和桃树坪断层影响带的电性反映。然而,

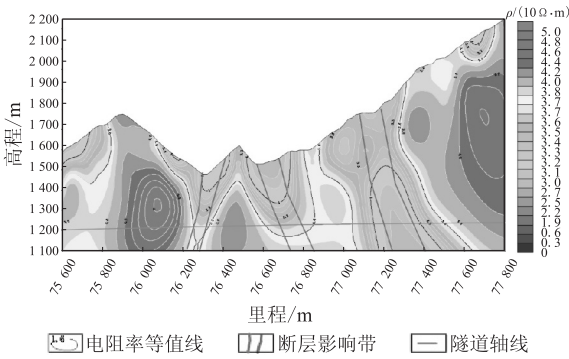


图 6 AMT 二维反演解释结果图(V8)

三元沟断层的物探解译与前期地质调查工作存在偏差, 为了验证物探解译, 在 DK 76 + 280 处进行了钻探, 发现隧道洞身处的岩芯极度破碎, 出现了大量构造碎裂岩, 由此证实了 DK 76 + 280 处为三元沟断层与洞身相交处。

3.4 Aether 系统探测

测区位于渝陕交界强烈切割的大巴山山岳地带, 根据前期地质调绘资料, 隧道洞身在 DK 102 + 945 ~ + 980 穿越菩萨岩 1 号断层, 交角大概为 61°。该断层为逆断层, 上下盘岩性均为寒武系下统水井沱组上段( $\epsilon_1 s^2$ )粉砂岩、粉砂质页岩夹细砂岩, 电阻率 1 ~ 250  $\Omega \cdot \text{m}$ , 洞身与断层交汇处岩体破碎 ~ 极破碎, 对隧道工程后期施工影响较大。此次任务是查明菩萨岩 1 号断层破碎带宽度。

野外数据采集使用的是美国 CG 公司 2018 年生产的 Aether 电磁采集系统, 首先使用 PrMT(大地电磁预处理软件)对野外原始数据进行预处理, 得到原始的视电阻率和相位曲线, 然后采用采用 MTPioneer 软件进行测点编辑和地形校正, 最后通过二维反演得出电阻率断面图, 结果如图 7 所示, 图中纵坐标代表高程, 横坐标为隧道里程位置。由图 7 可知, 该段电阻率以中低阻为背景, 浅部的低阻反应为覆盖土层或全风化岩石的电性反应。纵观整个电阻率断面图, 在 DK 102 + 950 附近存在一个明显的梯度带, 两侧的电阻率存在明显差异结合地质资料和以往经验, 将其判定为断层破碎带的电性反应, 在洞身的宽度大约为 40 m。

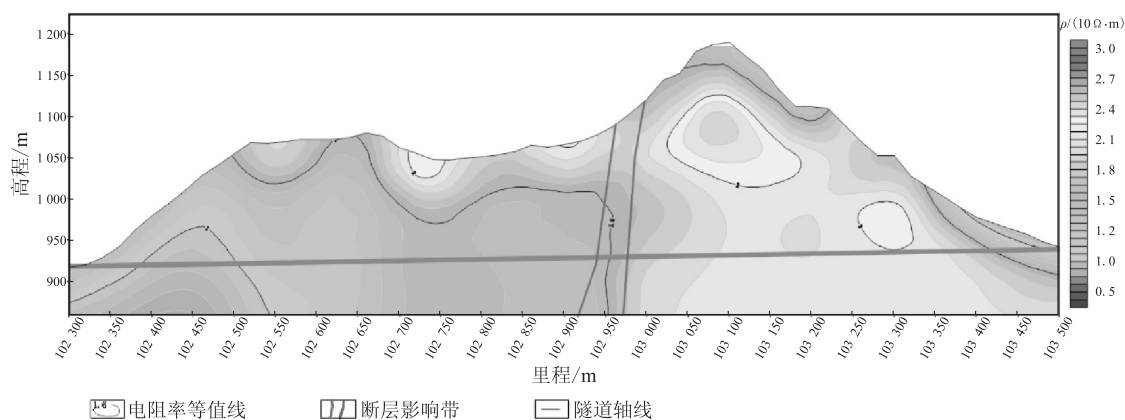


图7 AMT 二维反演解释结果图(Aether)

为验证物探解译,在DK 102+960处进行了钻探,岩芯中出现大量的构造碎裂岩和断裂面。

由上述4种不同的AMT法仪器在西渝高速铁路沿线断层探测结果可知,AMT法是一种适应于地形地质复杂且大埋深条件下铁路隧道断层探测的物探方法。然而,4种仪器在对于断层破碎带的电性反应上有些许差异,其中EH4、ADU-07e和V8这3种仪器得出来的AMT法电阻率断面图中对于断层破碎带的电性反应主要表现为向下延伸的低阻异常带,而Aether得到的电阻率断面图表现为梯度带。

## 5 结论

(1)在AMT勘探工作中,前期的踏勘工作和合理的测网布置,以及数据采集时的参数设计和正确布极是取得良好原始数据的基础,而良好的原始数据是获得真实反映地下介质的反演电阻率断面图的基石。

(2)AMT探测方法在不同岩性、不同埋深和地形条件复杂的隧道勘探工作中,都能有效的对断层破碎带进行识别,是一种行之有效的物探手段,可为铁路隧道设计及后期施工提供一定的参考依据。

(3)不同的仪器对于断层破碎带的电性反应是有区别的,在野外工作和室内处理解释过程中应注意。4种仪器的探测结果对于断层产状的反映并不明显,还需进一步研究。为更好的对比4种仪器的铁路隧道上的勘探效果,可将4种仪器运用在同一隧道上对比勘探成果。

(4)AMT法资料解译过程中须结合地质资料和钻探资料综合分析,才能得到更准确地判释结果。

## 参考文献:

- [1] 刘战. 音频大地电磁法在探测断层发育区中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(5): 730-736.  
LIU Zhan. Application of Audio Magnetotelluric Method to Detecting

- Fault Area [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(5): 730-736.
- [2] 周超,赵思为. 等值反磁通瞬变电磁法在轨道交通勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(1): 60-64.  
ZHOU Chao, ZHAO Siwei. The Application of Opposing Coils Transient Electromagnetic Method to Exploration of Rail Transit [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(1): 60-64.
- [3] 李俊杰,何建设,严家斌,等. 超高密度电阻率法在隐伏断层探测中的应用[J]. 物探与化探, 2016, 40(3): 624-628.  
LI Junjie, HE Jianshe, YAN Jiabin, et al. The Application of Ultra-High Density Resistivity Method to the Detection of Buried Fault [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(3): 624-628.
- [4] 刘明辉,薛建,王者江,等. 工程场地隐伏断裂的探测与地震活动性评价[J]. 物探与化探, 2018, 42(4): 839-845.  
LIU Minghui, XUE Jian, WANG Zhejiang, et al. The Detection of Buried Faults in Engineering Sites and the Evaluation of Seismic Activity [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(4): 839-845.
- [5] 曹哲明. 音频大地电磁法在宜万铁路隧道勘察中的应用效果[J]. 铁道勘察, 2004, 30(1): 53-54.  
CAO Zheming. Application of Voice Frequency Telluric Electromagnetic Method in Tunnel Exploration of Yichang-Wanzhou Railway [J]. Railway Investigation and Surveying, 2004, 30(1): 53-54.
- [6] 王焱,曹哲民,汤井田,等. 铁路隧道工程勘察中高频大地电磁测深应用效果研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(3): 424-428.  
WANG Ye, CAO Zhemin, TANG Jingtian, et al. Application of the High Frequency Magnetotelluric Sounding in the Exploatory Investigation of Railway Tunnel Engineering [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3): 424-428.
- [7] 蔡盛,陈洪杰. 综合物探技术在深埋隧道勘探中的应用[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(S1): 127-130.  
CAI Sheng, CHEN Hongjie. The Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Technique in Deep Tunnel Survey [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(S1): 127-130.