

## 勘探方法

# 磁源瞬变电磁法在铁路隧道勘察中的应用

孙战<sup>1</sup> 李树军<sup>2</sup> 王英伟<sup>3</sup> 陈丹<sup>1</sup> 安继魁<sup>4</sup>

1.辽宁省国土资源调查规划局, 辽宁沈阳, 110032; 2.辽宁省化工地质勘查院, 辽宁锦州, 121000; 3.黑龙江省区域地质调查所, 黑龙江哈尔滨, 150080; 4.辽宁工程勘察院, 辽宁锦州, 121000

**提 要** 在铁路建设中, 对长大深埋隧道的勘察, 需要对各种不同深度的地质体进行探测, 采用磁源瞬变电磁法工作前必须通过实地试验工作, 合理地选取工作装置、设置仪器参数。从方法原理特点出发, 结合实例总结出了一组适合瞬变电磁仪进行浅、深部探测的工作参数及需注意的问题, 实践表明磁源瞬变电磁法在铁路隧道勘察中具有很大的应用潜力。

**关键词** 磁源瞬变电磁法 铁路隧道勘察 工作参数选择 探测深度

中图分类号: P631.325 文献标识码: A 文章编号: 1006-5296(2007)01-0020-07

## 0 前言

随着我国基本建设不断深入, 隧道工程已经成为铁路、公路和水利水电等大型项目中的重要工程。东北东部铁路通道新建铁路工程, 地段多为山区, 隧道工程密集, 其中长大深埋隧道较多, 所处地形复杂, 地层岩性、地质构造、水文地质、地质灾害及不良地质问题较多。在隧道勘察中, 一般都需要查明覆盖层、风化层厚度, 基岩面的埋藏情况、构造的分布情况及隧道围岩类别情况等等。在实际工作中, 单一的钻探工作面临诸多困难, 提供的资料远不能满足设计和施工需要, 因此, 采用适宜的物探方法开展勘察工作势在必行。近年来, 随着电子技术、计算机技术的发展, 各种高精度数字式野外仪器的开发, 高密度电法及瞬变电磁法的频繁应用, 取得了良好的效果, 东北东部铁路通道新建铁路工程就是选用了高密度电法及瞬变电磁法的组合方法进行了隧道工程的勘察, 本文主要介绍磁源瞬变电磁法在铁路隧道勘察中的应用。

## 1 磁源瞬变电磁法简介

瞬变电磁法 (Transient electromagnetic method 简称 TEM) 是利用不接地回线或接地电极向地下发送脉冲式一次电磁场, 利用线圈或接地电极观测该脉冲电磁场感应的地下涡流产生的二次电磁场的空间和时间分布, 从而解决有关地质问题的时间域电磁法。磁源瞬变电磁法的场源采用不接地磁源而得名, 它有以下特点: ①把频率域的精度问题转换成灵敏度问题, 加大功率灵敏度可以增大信噪比, 从而可加大勘探深度; ②有穿透低阻覆盖的能力, 探测深度大; ③在高阻围岩地区不会产生地形起伏影响的假异常, 在低阻围岩区, 由于是多道观测, 早期道的地形影响也较易分辨; ④可采用同点组合进行观测, 使与探测目标的耦合最紧, 取得的异常响应强, 形态简单, 分辨能力强; ⑤线圈定点、点位或接发距要求相对不严格, 测地工作简单, 工效高; ⑥与测深工作同时完成, 提供了更多有用信息, 减少多解性。

\* 第一作者简介: 孙战 (1969~), 男, 地质勘查、法律学士, 高级工程师

收稿日期: 2006-09-18; 改回日期: 2006-11-06

### 1.1 磁源场区的划分与探测深度的关系<sup>[1]</sup>

磁源一般用综合参数  $\tau_0$  (无量纲) 的值来划分场区,  $\tau_0 = t\rho / (\mu_0 a^2)$ , 式中  $\rho$  为半空间电阻率、 $t$  为采样延时、 $\mu_0$  为空气的介电常数、 $a$  为回线半径。 $\tau_0 > 3$  为近区,  $\tau_0 < 0.01$  为远区,  $0.01 < \tau_0 < 3$  为中区, 当探测深部目标物时, 主要利用取样较后的响应, 只考虑磁场直接传入地下的能量, 属近区测量; 当探测浅部目标物时, 要考虑电磁波两种传播途径的作用, 属于中、远区测量。

### 1.2 两种回线组合的正常场近、远区瞬变响应及电阻率公式<sup>[2]</sup>

设半径为  $a$  单匝回线铺设于均匀非磁性导电半空间 (正常场) 表面上, 在  $t=0$  的瞬间, 回线中的电流  $I$  阶跃地下降为零:

$$I(t) = \begin{cases} I & t \leq 0 \\ 0 & t > 0 \end{cases}$$

则均匀半空间的电动势响应为:

$$\varepsilon_c = \frac{2\pi I \rho}{a} f_c(\tau_0)$$

式中  $f_c(\tau_0)$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} x J_1^2(x) \frac{1}{\sqrt{\pi \tau_0}} \left\{ e^{-x^2 \tau_0} - x \sqrt{\pi \tau_0} \cdot [1 - \Phi(x \sqrt{\tau_0})] \right\} dx$$

$J_1(x)$  为一阶一类贝塞尔函数, 由此可得:

对于重叠回线, 半径为  $a$  的方回线有:

$\tau_0 \leq 0.01$  时,  $\varepsilon_c = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 a}{t \sqrt{\pi t}} I$ , 可见与电阻率无关;

$\tau_0 \leq 0.0$  时,  $\varepsilon_c = \frac{I \mu_0^{5/2} a^4}{20 \pi \sqrt{\pi \rho}^{3/2} t^{5/2}}$ , 其电阻率为

$$\rho_r = 6.32 \times 10^{-3} a^{8/3} \left( \frac{\varepsilon_c}{I} \right)^{-2/3} \cdot t^{-5/3}.$$

对于中心回线, 半径为  $a$  的方回线有:

$\tau_0 \leq 0.0$  时,  $\varepsilon_l = \frac{3\sqrt{\pi} I A_R \rho}{a^3}$ , 式中  $A_R$  为接收线圈

的有效面积, 可见与取样时间无关, 而与电阻率有关, 其电阻率为  $\rho_r = 0.188 a^3 A_R^{-1} \frac{\varepsilon_l}{I}$ ;

$\tau_0 \geq 1$  时 (近区),  $\varepsilon_l = \frac{I \mu_0^{5/2} A_R a^2}{20 \pi \sqrt{\pi \rho}^{3/2} t^{5/2}}$ , 其电阻率为

$$\rho_r = 6.32 \times 10^{-3} A_R^{2/3} a^{4/3} \left( \frac{\varepsilon_l}{I} \right)^{-2/3} \cdot t^{-5/3}.$$

公式中的有关参数的单位均为国际制单位。

## 2 仪器设备及主要技术指标

仪器使用重庆奔腾数控技术研究所研制的 WTEM-1Q/GPS 浅部瞬变电磁勘探系统、WTEM-1D 10kW 大功率发射机及 WTEM-1T/GPS 发射机同步控制器。该瞬变电磁系统使用蓝牙无线通讯技术操控, 程控硬件滤波器、独特精准的供电频率、数据叠加、软件滤波, 使仪器具有超常的抗干扰能力; 多测道、测道多少可由操作员设置, 具快速关断的发射机; 全程深度探测, 本系统配备的大功率发射机测深可达数十米至上千米, 使用小功率发射机可完成数米至数十米超浅部深度探测; 支持多种同步方式, 发射机与接收机既可使用同步电缆进行同步, 也可根据需要使用石英钟同步, 还可根据需要使用 GPS 同步, 操控界面友好、功能强大, 全中文掌上电脑完成人机界面及采集控制, 现场实现采集参数设置、数据显示与存储、各种曲线绘制, 仪器的主要技术指标见表 1。

## 3 工作方法与技术

野外工作的展开主要是围绕方法的有效性和经济性而进行, 在这里方法的有效性指的是有效探测深度, 经济性就是工作效率, 二者为一对矛盾统一体, 工作时需要兼顾。在瞬变电磁理论基础前提下, 结合仪器的主要技术指标, 针对测试区的地质条件及地球物理特征, 进行试验工作, 试验工作的主要内容包括工作装置和回线大小的选取、仪器参数的选配、阻尼电阻的匹配等。

### 3.1 影响探测深度的因素与装置、回线大小的选择

瞬变电磁法中, 估计探测深度通常用  $H=0.55(M\rho_1/\eta)^{1/5}$  ( $M$  为发送磁矩,  $\rho_1$  为覆盖层电阻率,  $\eta$  为最小可分辨电压), 可见, 为了提高探测深度, 可以采用提高  $M$  或降低  $\eta$  值

表1 仪器的主要技术指标

Table 1 The main technique index of the equipments

WTEM-1Q/GPS 系统	小功率发射机	WTEM-1D 10kW 大功率发射机
通道数: 1 道	发射电压: 5.5~20V	发射电压: 12~200V
测道数: ≤50 道	发射电流: ≤10A	发射电流: ≤50A
前放增益: 8、32 倍	电流测试精度: ±1%	电流测试精度: ±1%
主放增益: 1、2、4、8、16、32、64、128 倍	供电频率: 4、8、16、32Hz	发射电压分辨率: 0.1V
最小采样间隔: 1μs	发射波形: 等宽双极性波	供电频率: 0.0625~32Hz
通频带: 0~400kHz	关断时间: 0.1~100.0μs	发射波形: 等宽双极性波
叠加次数: 1~9999 次		关断延时: 160ns

的方法。由于  $M=I \cdot S_T$  ( $S_T$  为发送回线的面积), 所以为了加大探测深度, 只能加大发送回线的面积和加大发送电流。根据电磁理论, 对于地质三度导体, 发送电流关断时间  $t_{of}$  与畸变因子  $D_f$  (实际观测值与理论值的比值) 有如下公式:  $D_f = t/t_{of} (1 - e^{-t/t_{of}})$ , 其中,  $t$  为地质导体的时间常数。对于具体的测区而言, 时间常数是一定的, 所以增大  $t$  值将使观测值愈偏离理论值, 故减小发射机的关断时间  $t_{of}$  能提高观测精度, 相应地提高仪器的探测深度<sup>[3]</sup>。本次工作对浅部目标物的探测采用重叠回线装置, 回线大小为 50m×50m, 对深部目标物的探测采用中心回线装置, 发射框为

50m×50m, 接收回线为 10m×10m。

### 3.2 仪器工作参数的选配

根据隧道埋藏深度情况, 本次采用两种组合方式进行采集, 重叠回线装置, 高频 32Hz 进行浅部测量; 中心回线装置, 低频 16Hz 进行中深部测量、关断时间 1~100μs、发射电流 3~50A、前放增益 8 倍, 主放增益 64 倍、100 次叠加。调节好各参数, 压制干扰使衰减曲线既能反映出深部信息, 又要使曲线不溢出, 反映出浅部信息, 当完成两个以上测点时可显示剖面曲线, 进行全面监控, 曲线见图 1。

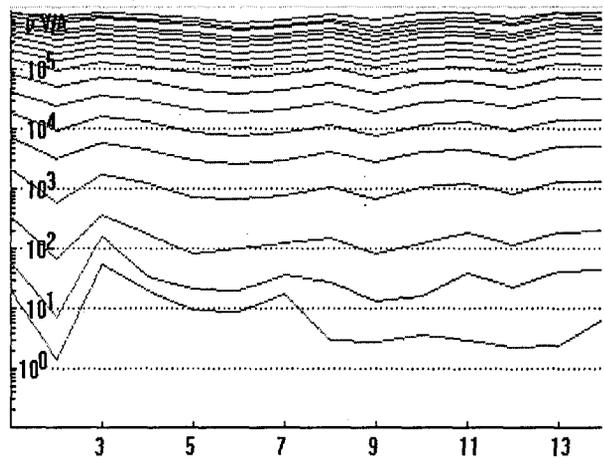
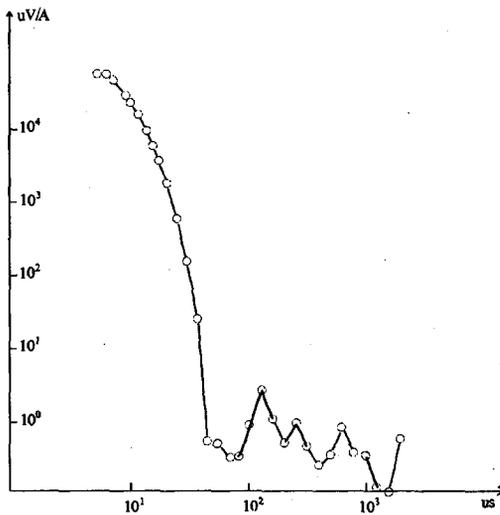


图1 瞬变电磁衰减曲线与响应电位曲线

Fig.1 The convergent and response curves of the transient electromagnetic method

### 3.3 阻尼电阻的匹配

阻尼电阻的阻值越小, 阻尼越大, 一般选择原则是宁过勿欠。如果欠阻尼, 发射线圈电

流在关断时可能振荡从而干扰测量; 如果过阻尼, 发射线圈电流的关断时间随之增加, 不利于浅部信息采集。阻尼电阻的选择可在现场根

据装置形式、线圈大小、电流强弱及线圈与大地的耦合程度等众多因素进行调试而确定。

### 3.4 野外工作注意事项

外业工作前,对仪器设备进行检查,确保仪器性能正常;正式工作前先进行试验,为了对比分析,工作参数一经确定就用于整个工区不得更改;线框布设时,校对测量桩号,线框布置准确到位,不得将剩余导线留在绕线架上,应将其呈S型展布于地面,导线联接处应接触良好,严禁漏电;应避开人文干扰大、地面有金属构件物和空中高压输电线的地方;对采集的信号实时监控,曲线出现畸变、遇异常点,突变点应重复观测,必要时加密测点;若曲线衰变慢时,应扩大测道时间范围重复观测;每个测点均重复三次观测,采用多次叠加技术,挑选重复性较好的数据进行存储。

## 4 资料的处理与解释

(1)对照原始野外记录,对观测数据逐点检查、编录。

(2)资料进行预处理:①校正关断时间;②圆滑曲线:由于各类干扰的影响,观测晚期有效信号较弱,信噪比降低使曲线的尾支出现波动,因此在满足探测深度的前提下,对曲线尾支剧烈跳跃时窗数据进行剪辑,并对保留的有效时窗观测数据的波动进行趋势圆滑处理。

(3)绘制成果图:对预处理后的观测数据进行格式转换和计算,经地形改正后,绘制剖面图与拟断面图。

(4)定量反演:采用一维瞬变电磁反演程序 IX1D ver3.4,实现地层电性剖面的反演。观测到的二次场是由地下不同导电介质受激励引起的涡流产生的非稳定磁场,它与地下地质体有关,根据它的衰减特征,可以定性分析地下地质体的电性、规模、产状等。一般说来,地质导体的时间常数愈大,异常体的导电性和体积的乘积愈大,通过它可定性判断异常体性质。

(5)隧道围岩等级的划分要综合考虑五种因素:①地层岩性及岩石等级;②围岩受地质

构造影响程度;③围岩节理(裂隙)发育程度;④地下水与风化作用的影响;⑤物探异常特征。

## 5 铁路隧道勘察中的应用实例

### 5.1 兴隆沟隧道

兴隆沟隧道全长 5115m,最大填挖深度为 222.94m,属于深埋长隧道。隧道地形复杂,表层为第四系松散堆积物,以残坡积物为主,局部沟、河谷为冲洪物,岩性为碎石土,局部为园砾土,充填砂及粘性土,厚度一般为 1~5m。小号里程基岩为侏罗系长梁子组砂砾岩、页岩,表层风化较强烈,层间裂隙发育,局部富水;大号里程为古元古代混合岩,全风化层较薄,强风化层较发育,全一强风化层厚度为 5~18m。

图 2 为隧道里程 DK26+300—DK27+400 段 TEM 综合成果图,以 DK26+800 为界,TEM 响应曲线出现两侧不对称形态,分别反映了较低阻的长梁子组地层和高阻的古元古代混合岩,在里程 DK26+750 附近和 DK27+350 附近,响应曲线出现极值,电阻率等值线出现相对低阻,推测为分别发育一条断裂构造,低阻是由于岩石破碎而富水所致,其中 DK27+350 附近的断裂构造被钻孔所证实。

### 5.2 大蜂蜜沟隧道

大蜂蜜沟隧道全长 4850m,最大填挖深度为 179.05m,属于深埋长隧道。隧道地貌单元为中低山,局部为山间沟谷、河谷,地势起伏较大,植被发育。上覆第四系残-坡积物、冲洪积物,厚度较小,岩性为碎石土;基岩为辽河群大石桥-高家峪组变粒岩夹大理岩,表层风化较强烈,全一强风化层厚度为 5~14m。

图 3 为隧道里程 DK40+800~DK41+800 段 TEM 综合成果图,很明显在里程 DK41+220 附近 TEM 响应曲线晚延时响应较强,两侧基本成对称状,同时电阻率断面出现低阻“漏斗”异常,推测该处发育一条断裂构造,倾向大里程,倾角较大。

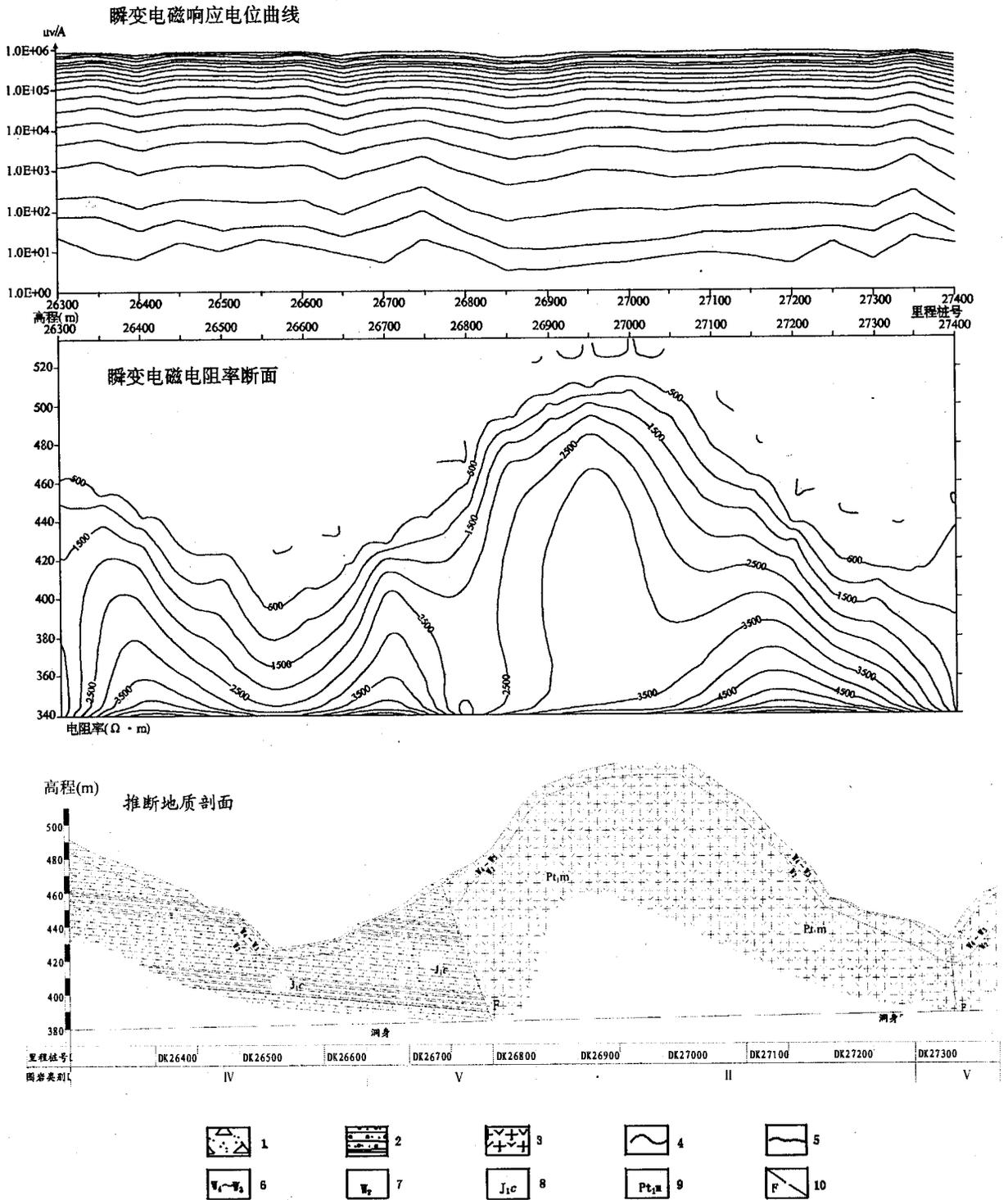


图2 兴隆沟隧道 DK26+300~DK27+400 段 TEM 综合成果图

Fig.2 The TEM synthetical production figure of XingLongGou tunnel of DK26+300~DK27+400 section

1.角砾土; 2.砂砾岩、页岩; 3.混合岩; 4.地质界线; 5.岩石风化界线; 6.岩石全-强风化; 7.岩石弱风化;

8.侏罗系长梁子组; 9.古元古代混合岩; 10.推测断层

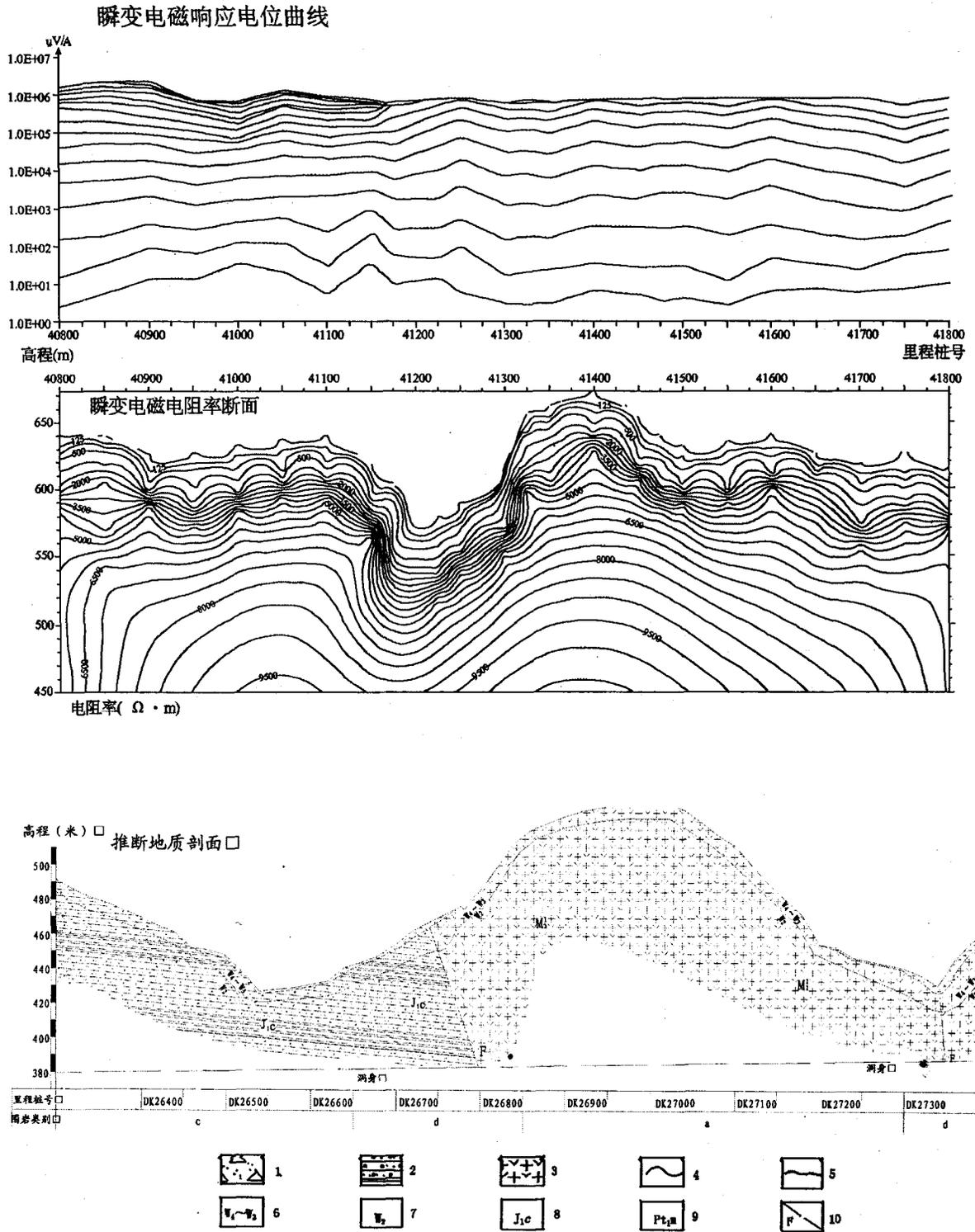


图3 大蜂蜜沟隧道 DK40+800—DK41+800 段 TEM 综合成果图

Fig.3 The TEM synthetical production figure of Dafengmigou tunnel of DK40+800—DK41+800 section

1.角砾土; 2.变粒岩; 3.地质界线; 4.岩石风化界线; 5.岩石全-强风化; 6.岩石弱风化; 7.大石桥-高家峪组; 8.推测断层

## 6 结语

勘查实践表明,磁源瞬变电磁是一种经济、快速、效果较好的地球物理方法,其本身的高分辨率及高精度(灵敏度)的仪器设备使得 TEM 在隧道勘察中寻找低阻目标物,诸如构造破碎带、岩性接触带及岩溶发育带均有较为理想的效果。在实际工作中,针对不同的地质条件,事先可以通过实地试验工作,合理地选取工作装置、设置参数,就可以对不同探测深度的地

质体进行探测。通过野外工作,总结出一组适合瞬变电磁仪进行浅、深部探测的接收参数,但任何物探方法都有其局限性,物探成果又具有一定的多解性,这就要求开展多方法的综合物探方法。磁源瞬变电磁法就其方法原理及实际应用效果来看,不仅可应用于隧道勘察,同时还可广泛应用于矿产勘探、水文与工程地质调查、灾害地质与环境调查、地热调查及考古等领域。

### 参考文献

- 1 蒋邦远.实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M].北京:地质出版社,1998
- 2 刘国兴.电法勘探原理与方法[M].北京:地质出版社,2005
- 3 柳建新,刘春明,童艳光,等.强场源瞬变电磁仪及在某铜矿的试验性应用[J].物探与化探,2004,28(2):130~132

## THE APPLICATION OF MAGNETISM SOURCE TRANSIENT ELECTROMAGNETIC METHOD TO THE RAILWAY TUNNEL EXPLORATION

Sun Zhan<sup>1</sup> Li Shujun<sup>2</sup> Wang Yingwei<sup>3</sup> Chen Dan<sup>1</sup> An Jikui<sup>4</sup>

1. Liaoning Bureau of Land Resources Survey and Planning, Shenyang, Liaoning, 110032, China;
2. Liaoning Chemical Geological Prospecting Institute, Jinzhou, Liaoning, 121000, China;
3. Heilongjiang Province Institute of Regional Geology Survey, Harbin, Heilongjiang, 150080, China.
4. Liaoning Engineering Exploration Institut, Jinzhou, Liaoning 121000, China

### Abstract

From the method principle of the transient electromagnetic method, combining function of the equipments, the paper describes the fieldwork method and technique, the method of data explain and the main regulation of magnetism source transient electromagnetic method to the railway tunnel exploration. The paper recounts relationship between the choice of operating parameters and the exploration depth. In final the article explains the good result from two successful examples of magnetism source transient electromagnetic method to the railway tunnel exploration.

**Key words:** magnetism source transient electromagnetic method, the railway tunnel exploration, choice of operating parameters, exploration depth