

文章编号: 1001-1749(2023)04-0523-08

等值反磁通瞬变电磁在隧道超前地质 预报中的解释方法研究与应用

赵晓亮¹, 冉军², 雷凯¹, 刘黎东¹, 裴世建¹, 张继锋³, 张吉振⁴

(1. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308;

2. 贵阳市城市轨道交通集团有限公司, 贵阳 550081;

3. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054;

4. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300251)

摘要: 瞬变电磁法具有对低阻体反应灵敏的特点, 在探测隧道掌子面前方含水或充泥断层、破碎带等低阻不良地质体上具有独特的优势。这里首先简单介绍了等值反磁通瞬变电磁法的原理及特点, 然后通过对隧道全空间域高低阻模型一维正演曲线响应特征、视电阻率及视纵向电导曲线的解释特点和效果进行较为全面地分析研究, 提出并分析了视电阻率等值线图与视纵向电导断面图联合解释方法。最后通过两个应用案例, 总结出等值反磁通瞬变电磁在隧道超前地质预报成果解释中的一些特点和规律。结论表明, 等值反磁通瞬变电磁方法适用于隧道超前地质预报工作, 能够有效提高预报成果的精度及准确度。

关键词: 等值反磁通瞬变电磁; 视电阻率; 视纵向电导; 超前地质预报

中图分类号: P 631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.04.13

0 引言

在隧道超前地质预报中, 瞬变电磁法(TEM)因其对低阻体反应灵敏的特征, 在含水或充泥断层、破碎带等探测中有着独特的优势。近年来, 众多学者将瞬变电磁法引入到隧道超前地质预报工作中来, 起到了对含水构造和地下水较好的预报效果^[1-4]。

1) 在仪器方面, 目前大部分常规仪器由于无法真正解决一次场自感和关断效应产生的影响, 导致接收线圈接收到的信号在早期实际上是包含一次场和二次场的叠加, 因而常规瞬变电磁法在浅部会存在浅层盲区。等值反磁通法通过线圈装置的改进, 采用上下平行共轴的两个相同但电流相反的发射线

圈, 且在双线圈合成的一次场零磁通面上, 将接收线圈置于一个零磁通面上进行数据采集, 可避免一次场干扰早期二次场的采集, 实现基本消除瞬变电磁法的浅层盲区, 提高了瞬变电磁法浅层探测的能力^[5]。

2) 在数据处理与解释方面, 目前视电阻率曲线及剖面成果是解释不良地质体的主要判别依据。由于瞬变电磁场和地质条件的复杂性, 单一的视电阻率断面解译异常会出现较大难度, 而视纵向电导曲线解释有很多优点, 相比于视电阻率法, 反演成像更直观, 分层效果更好, 尤其对高低阻薄层等层状介质能够有较好的成像效果^[6-9]。因此将视电阻率等值线图和视纵向电导断面图联合解释, 有效提高了超前地质预报成果的精度和可靠性^[1-4, 6-8]。

收稿日期: 2022-04-10

基金项目: 中国中铁股份有限公司 2020 年度科研开发课题(KY-2020-02); 陕西省自然科学基金(2021JM-159); 中国国家铁路集团有限公司 2019 年度科研开发课题(2019YY120101)

第一作者: 赵晓亮(1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事铁路工程物探与隧道超前探测研究工作, E-mail: 943582065@qq.com。

通信作者: 冉军(1987-), 男, 本科, 工程师, 主要从事工程建设管理与岩土工程勘察, E-mail: 474119432@qq.com。

1 等值反磁通原理简述

等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM),是测量等值反磁通瞬态电磁场衰减扩散的一种新的瞬变电磁法,由中南大学席振铎教授提出^[5]。该方法主要以相同2组线圈通以反向电流时产生等值反向磁通的电磁场时空分布规律,采用上下平行共轴的两组相同线圈为发射源,且在该双线圈源合成的一次场零磁通平面上,测量对地中心耦合的纯二次场,装置示意图见图1。实现了基本消除瞬变电磁法的浅层盲区、提高浅层探测能力的目的。

双线圈在地面发射瞬态脉冲电磁场信号,其中一组线圈置于近地表面,在瞬态脉冲断电瞬间,近地表叠加磁场最大,因此在相同的变化时间下,感应涡流的极大值面集中在近地表,感应涡流产生的磁场最强。随着关断间歇的延时,地表感应涡流逐渐衰减又产生新的涡流极大值面,并逐渐向远离发射线圈的深部、边部方向扩散,即为 M. N. Nabighian 形象描述的瞬变电磁法的“烟圈效应”。涡流极大值面的扩散速度和感应涡流场值的衰减速度与大地电性参数有关,一般在非磁性大地中,主要与电导率有关;大地电导率越大,扩散速度越小,衰减得越慢。根据地表接收到的涡流场信号随时间的衰减规律,即可获得地下电导率信息^[11]。

2 视纵向电导解释方法原理与数值模拟

2.1 等效薄板理论

等效导电平面,是根据视纵向电导曲线的特征直观地划分地层的一种近似解释方法^[6-10]。由于该方法可以形象理解为随着时间 t 的增减,假想等效导电平面以 $1/\mu_0\sigma$ 的速度上下“浮动”,因此也称为“浮动薄板理论”。

对于层状介质而言,等效电导平面的浮动速度分别与各层的电导率有关,不是恒定值。因此引入 h 效率来表示等效导电平面的深度,它等于组成断面的单位薄层的平均厚度:

$$h_{\text{效}} = \left[\frac{\int_0^H \sigma(z) z^g dz}{\int_0^H \sigma(z) dz} \right]^{1/g} = \left[\frac{\int_0^H \sigma(z) z^g dz}{S} \right]^{1/g} \quad (1)$$

式中: $\sigma(z)$ 为介质电导率; H 为研究深度,即某一时刻对异常作实质贡献的深度; S 为研究深度对应的

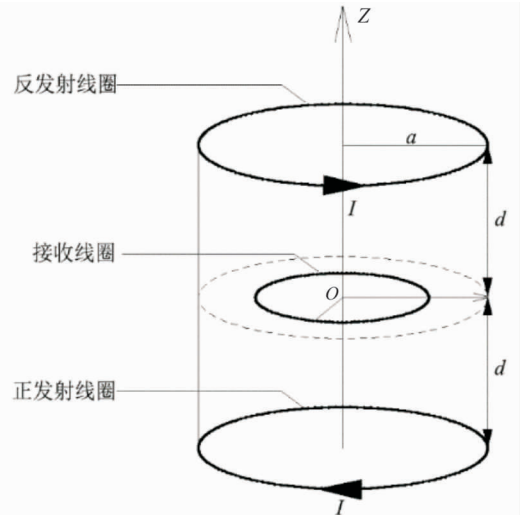


图1 等值反磁通瞬变电磁装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of opposing coils transient electromagnetics device

总纵向电导; g 为确定上地层、下地层相对的权参数, $g>0$ 。一般的经验值取 $g=1.5$; $h_{\text{效}}$ 等于等效导电板的中心深度, $0 \leq h_{\text{效}} \leq H$ 。

2.2 视纵向电导计算

引入视纵向电导定义^[10]

$$S_{\tau} = \frac{KF(\bar{m})}{\frac{\partial B_z(t)}{\partial t}} \quad (2)$$

其中: $K = -\frac{6I}{a^2}$ 为辅助参数; a 为发射回线半径; I 为发射电流; \bar{m} 是研究深度有关参数; $F(\bar{m})$ 为 \bar{m} 函数,可理解为断面函数^[12-13]; $\frac{\partial B_z(t)}{\partial t}$ 为实测感应电动势,在层状介质表面可近似表达为式(3)。

$$\frac{\partial B_z(t)}{\partial t} = -\frac{6I}{Sa^2} \frac{\frac{4}{9} H_0^2 \cdot a^4}{[a^2 + \frac{64}{81} H_0^2]^{5/2}} = -\frac{8Ia^2}{3S[a^2 + \frac{64}{81} H_0^2]^{5/2}} \quad (3)$$

式中: $H_0 = (2H^{3/2} + h^{3/2})/h^{3/2}$ 。

同时在 $g=1.5$ 时,得到时间 t 的表达式为式(4)。

$$t = \left[\frac{8}{9} \frac{H^{3/2}}{h_{\text{效}}^{1/2}} - \frac{5}{9} h_{\text{效}} \right] u_0 S \quad (4)$$

因此由式(3)、式(4)推导可知, $\frac{\partial B_z}{\partial t}$ 是关于 H 的函数,再根据 H 与 t 的关系可求得 $\frac{\partial B_z}{\partial t}$ 与时间 t 的关系曲线 $\frac{\partial B_z(t)}{\partial t}$ 。

2.3 解释方法

为更直观地确定隧道地层电性参数,首先可确定 $S_r(t) \sim H_r(t)$ 曲线。其中

$$H_r(t) = (m - t/\mu_0 S_r)^{1/3} \left(\frac{9}{8} m - \frac{t}{\mu_0 S_r} \right)^{2/3} \quad (5)$$

$H_r(t)$ 是时间 t 的函数。以 S_r 为纵坐标, H_r 为横坐标,即构成 $S_r(t) \sim H_r(t)$ 曲线。该曲线特征如下:

1) 如果围岩介质均匀,则 $S_r(H_r)$ 曲线为倾角为 α 的直线。

2) 层状介质中, $S_r(H_r)$ 曲线具有不同电阻率分界面引起的一系列折线,每一直线段的斜率即为相应地层段的电导率值。根据曲线的转折点的位置可确定地层的顶底界面、层厚和视纵向电导。由于 $\rho_r = \frac{\Delta H_r}{\Delta S_r}$,故可以根据每一直线段的斜率求取视电阻率。

3) 良导层的 $S_r(H_r)$ 曲线上升较快,对应的视纵向电导曲线斜率大,高阻层的斜率比良导体(低阻层)小,各线段斜率值下相对应该层的纵向电导值相近。

4) 对比一条测线上的曲线形态,可以连续追踪同一地层界限,形成地面断面。

然而由于 $S_r(t) \sim H_r(t)$ 曲线只能大概读出曲线拐点的深度位置,要得到更具体的关于地下目标体的参数信息,可以对 $S_r(t) \sim H_r(t)$ 曲线求取二阶导数曲线。二阶导数曲线的极值点对应 S_r 曲线斜率突变点位置,由高阻变成低阻的 S_r 曲线突变点对应二阶导数的正极值,而由低阻过渡为高阻的 S_r 曲

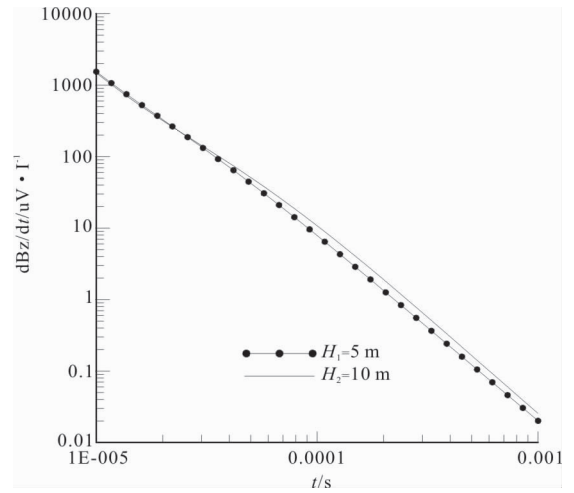


图2 低阻H模型衰减电压曲线

Fig. 2 Low resistance H model attenuation voltage curve

线突变点位置对应负极值位置^[14],可见将视纵向电导求取二阶导数后,电性界面位置在二阶导数曲线上更加明显。故笔者在视纵向电导曲线上主要应用其二阶导数进行解释^[16]。

2.4 全空间时域数值模拟

根据隧道内的实际情况,选择三层地电模型进行正演计算,①充水断层或破碎带等低阻层的数值模拟;②不含水断层或破碎带的数值模拟(高阻层)。

2.4.1 低阻层模拟

设计一个H型模型,掌子面前方第一层电阻率 $\rho_1 = 100 \Omega \cdot m$,层厚 $H_1 = 30 m$;第二层电阻率为 $\rho_2 = 10 \Omega \cdot m$,厚度 H_2 分别为 $5 m$ 、 $10 m$;第三层电阻率 $\rho_3 = 100 \Omega \cdot m$,收发装置布置于掌子面上,发射线圈等效面积为 $31.4 m^2$,接收线圈等效面积为 $400 m^2$ 。

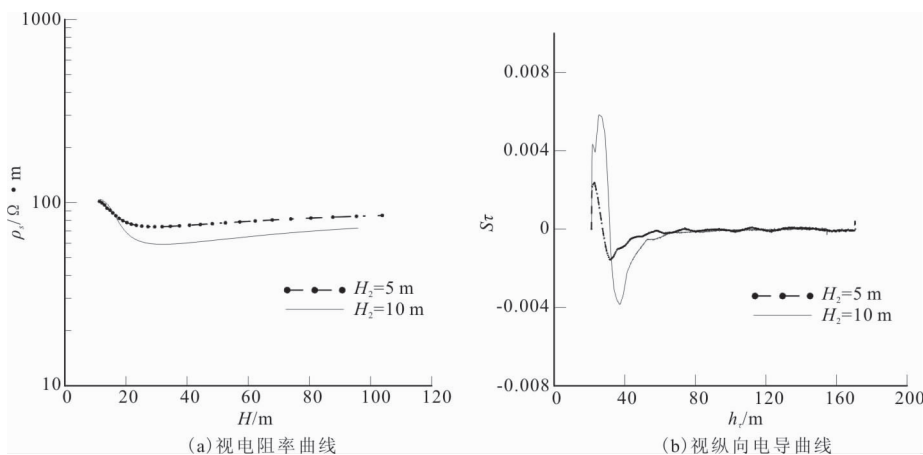


图3 低阻H模型成像结果

Fig. 3 Imaging results of low resistance H model

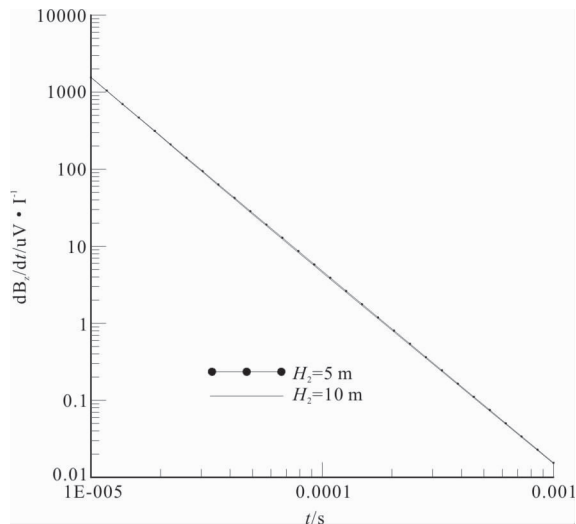


图4 高阻K模型衰减电压曲线

Fig. 4 High resistance K model attenuation voltage curve

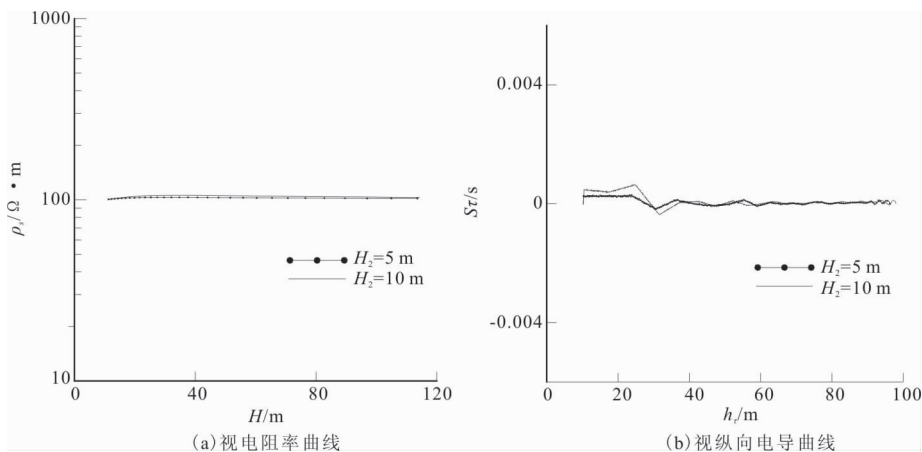


图5 高阻K模型成像结果

Fig. 5 Imaging results of high resistance K model

高阻 K 模型正演瞬变电磁响应结果如图 4 所示,从图 4 可以看出,在高阻 K 型与低阻 H 模型电性参数 $\rho_1 = \rho_3 = 100 \Omega \cdot \text{m}$, 层厚 $H_1 = 30 \text{ m}$, $\rho_2 / \rho_1 = 0.1$ (低阻) 或 $\rho_2 / \rho_1 = 10$ (高阻) 相同的电阻率比值条件下,高阻体层厚变化引起的瞬变电磁衰减曲线变化较小,进一步说明了瞬变电磁对低阻体反映灵敏的特征。视电阻率曲线可以看出,当 $H_2 = 5 \text{ m}$ 或 10 m 时,视电阻率曲线均不能较明显地反映出高阻 K 型异常。视纵向电导曲线上对中间高阻薄层的电性界面能较好反映出来,在视纵向电导曲线(二阶导数)负正极值位置(顶界面深度为 30 m ,底界面深度分别为 35 m 、 40 m)能基本对应高阻层的顶底界面。

数值模拟结果表明:①对于隧道环境模型,视电

2.4.2 高阻层模拟

设计一个 K 型模型,掌子面前方第一层电阻率 $\rho_1 = 100 \Omega \cdot \text{m}$, 层厚 $H_1 = 30 \text{ m}$, 第二层电阻率为 $1000 \Omega \cdot \text{m}$, 厚度 H_2 分别为 5 m 、 10 m , 第三层电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$, 收发装置布置于掌子面上,发射线圈等效面积为 31.4 m^2 ,接收线圈等效面积为 400 m^2 ,数值模拟成果见图 4~图 5。

低阻 H 模型正演瞬变电磁响应结果如图 2 所示,从图 2 可看出,随着中间低阻层厚度变大,瞬变电磁响应曲线上凸特点更明显,与瞬变电磁理论相符。视电阻率曲线可看出,当 $H_2 = 5 \text{ m}$ 时,视电阻率曲线图 3(a)反映的低阻异常较难分辨出来;当 $H_2 = 10 \text{ m}$ 时,视电阻率曲线能较明显的反映出低阻 H 型异常。视纵向电导曲线图 3(b)上对中间低阻薄层的电性界面能很好反映出来,在视纵向电导曲线(二阶导数)正负极值位置(顶界面深度为 30 m ,底界面深度分别为 35 m 、 40 m)能基本对应低阻层的顶底界面。

阻率曲线不能有效反映出薄层地层的明显电性异常形态;②视纵向电导对时间具有高灵敏性,可在较早时间范围内,以较高灵敏度和信噪比将电性层分辨出来。

3 工程案例

3.1 瞬变电磁法与地质雷达联合探测

某在建高铁隧道位于广西地区,已贯通,属典型的喀斯特岩溶地貌,地下水丰富,岩溶发育现象强烈。自隧道掘进作业以来,已发现各类大小溶洞、溶腔 50 多处,稍有不慎就会引发失稳、坍塌等不良后果,给隧道施工带来了巨大隐患。在隧道 16#横通

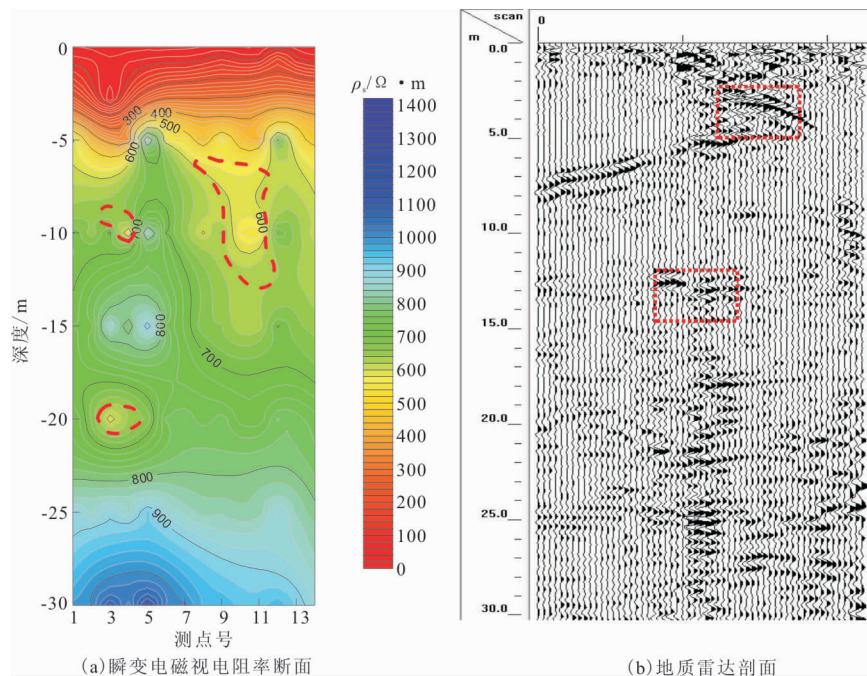


图6 两种物探成果断面对比

Fig. 6 Comparison of two geophysical results

道(往大里程方向)开展瞬变电磁超前地质预报工作。采用 HPTEM-18 等值反磁通瞬变电磁设备,根据本次 30 m~50 m 的探测深度,选择发送频率 25 Hz,根据现场噪声干扰大小,选择叠加次数 400 次。瞬变电磁线圈紧贴掌子面,沿掌子面从左往右探测,测点数 14 个,点距为 0.5 m。在掌子面相同位置从左往右进行地质雷达探测,两种物探方法对比见图 6。

从图 6(a)可以看出,在测点 8~11 位置,沿隧道掘进方向前方,掌子面前方 6 m~13 m 段围岩瞬变电磁视电阻率值相对较低(断面上异常红色圈位置标识),整体呈现低阻条带状,推测该段低阻为岩溶异常;在测点 3 点~5 点之间,深度分别为 10 m、20 m 位置出现两处小的低阻圈闭异常,以此推测为岩溶或裂隙异常;在 24 m~30 m 视电阻率值升高,推测岩体完整性增加,富水性差或不含水。在地质雷达剖面上,雷达测线位置 4 m~5 m(即瞬变电磁测点 8~11 位置),掌子面前方 3 m~7 m 段出现由许多双曲线组成的强反射波,为较典型的岩溶洞穴异常;在掌子面前方 11 m~14 m 出现一组小范围的强反射界面,推测为一小范围富水带或裂隙发育异常。

从图 7 可以看出,(选取高质量瞬变电磁衰减曲线的测点数据进行微分电导计算),测点 5、测点 7 和测点 10 分别约在 6 m~10 m、12 m~19 m 位置

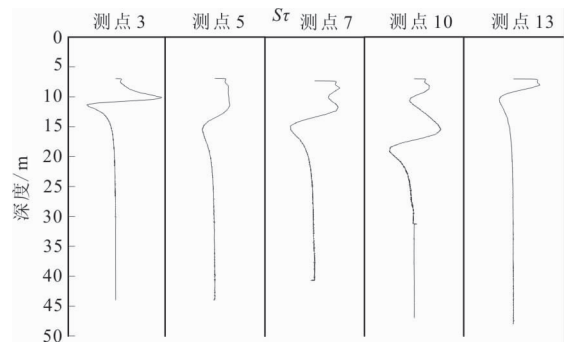


图7 瞬变电磁视纵向电导微分断面

Fig. 7 Transient electromagnetic apparent longitudinal conductivity section

出现电性分界面;而测点 3、测点 13 电导在深度 10 m 下几乎无分层显示。

隧道开挖结果表明(表 1),在开挖至掌子面前方 4 m~8 m 位置出现一处半充泥溶洞,与本次预报效果吻合。在隧道掌子面左侧前方 8 m~10 m、18 m~21 m 位置出现两处小的裂隙出水点异常,水量不大。

结合隧道实际开挖情况,瞬变电磁和地质雷达成果基本一致,验证了本次预报的准确性。视纵向电导微分断面图(图 7)上和视电阻率等值线图(图 6)对岩溶(低阻异常)都有反映,但在岩溶规模及空间位置(亦即岩性界面)的预报上,视纵向微分电导的解释成果要更为准确。

表 1 探测结果与开挖结果对比

Tab. 1 Comparison between detection results and excavation results

测线位置	低阻异常类型	实际开挖深度/m	视电阻率推断深度/m	视纵向电导推断深度/m
16#横通道	溶洞(半充泥)	4~6、8~10	7~13	6~10

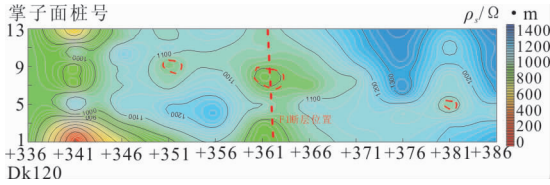


图 8 瞬变电磁超前预报视电阻率剖面图

Fig. 8 Apparent resistivity profile of DK120+336 tunnel face for TEM advanced prediction

3.2 瞬变电磁法与 TSP 联合探测

某在建高铁隧道位于广东沿海地区,已贯通,以剥蚀构造低山地貌为主,沿线地面标高 45 m~390 m,隧道最大埋深约 290 m。上覆第四系地层为低山丘陵坡残积黏土、粉质黏土,厚度为 2 m~5 m 不等,下伏岩层主要为燕山期多期次侵入花岗岩系岩层。区域燕山期构造运动比较强烈,构造发育^[13,15]。预报段落设计为 F1 断裂及其破碎带,且该位置上方为现有水库。瞬变电磁在 336 掌子面位置进行了探测,采用 HPTM-18 等值反磁通瞬变电磁设备。沿掌子面中部从左至右布设测线,点距 0.5 m,发送电流为 9.5 A~10.5 A,发射频率 12.5 Hz,叠加次数 400~600,预报范围设计为掌子面前方 0 m 至 50 m。同步采用 TSP-203 超前地质预报系统探测,预报范围设计为掌子面前方 0 m~100 m。

从图 8 可看出,0 m~50 m 即 DK120+336~+386 段围岩(黑云母花岗岩)视电阻率值整体呈中高阻(700 Ω·m~1 500 Ω·m),结合掌子面地质特征,推断解释该段围岩较破碎,节理裂隙较发育,地下水较发育,掌子面前方里程 DK120+351、DK120+381 附近视电阻率等值线出现低阻闭合区域,推断解释该段为富水区域,有出水可能;掌子面前方 22 m~34 m 即 DK120+358~+370 段围岩出现一相对低阻区,推段岩体有软硬不均现象,易形成局部蓄水,有较大出水可能,结合勘察资料推测为 F1 断层位置。

本次选取瞬变电磁(图 8)与 TSP(图 9)相同预报段,即掌子面前方 0 m~50 m(DK120+336~+

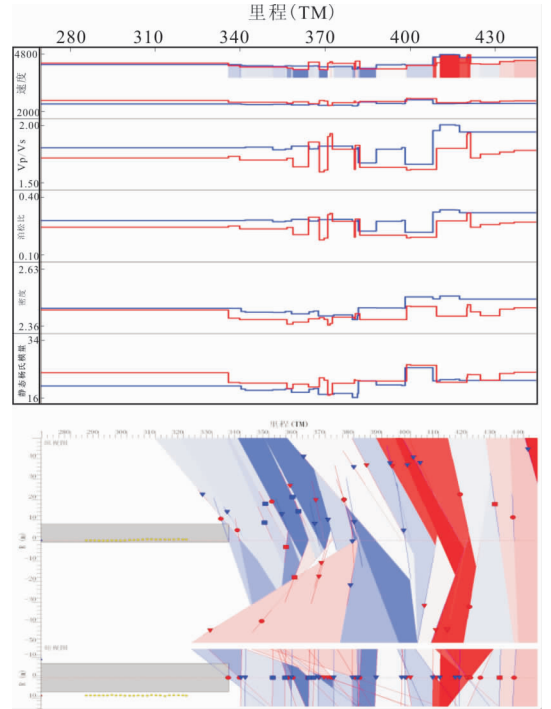


图 9 TSP 超前预报反射层位成果图

Fig. 9 TSP prediction of reflection horizon results

386)的预报结论与后期掘进资料(地质素描)的对比较验证情况如表 2 所示,可见预报结论与掘进资料整体吻合度较高,尤其瞬变电磁对地下水位置反映更准确。

4 结论

1)通过高阻、低阻薄层模型模拟计算表明,视纵向电导曲线能够以较高灵敏度和信噪比将电性薄层分辨出来,相较视电阻率曲线,具有更明显的异常反映和更高的分辨率,引入视纵向电导解释方法是可行的。

2)工程案例表明,视纵向电导结合视电阻率解释的等值反磁通瞬变电磁方法与常规预报方法在结果上相近,且经隧道掘进验证,瞬变电磁具有更高的预报准确度,同时缩减了预报盲区,该方法应用于隧道超前预报是有效的,值得推广应用。

表 2 瞬变电磁、TSP 超前地质预报成果与掘进资料对比验证一览表
Tab. 2 comparison and verification of transient electromagnetic and TSP
advanced geological prediction results with tunneling data

预报里程	预报围岩情况	预报地下水情况	掘进情况
DK120+336~ DK120+386	该段围岩整体较破碎~破碎,岩质硬~较软,围岩稳定性差	瞬变电磁预报:DK120+351、+381 富水,其中 DK120+358~+370 段推测为 F1 断层位置,有较大出水可能。TSP 预报:该段地下水较发育;其中在 DK120+360~+380 段发育地下水	DK120+353~+375 段为 F1 断层位置,多处呈股状出水。围岩较破碎~破碎,级别为 IV~V 级

参考文献:

- [1] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京:地质出版社, 1990.
- PIAO H R. Principle of electromagnetic sounding [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990. (In Chinese)
- [2] 李貅,全红娟,许阿祥,等. 瞬变电磁的微分电导成像[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(6):59-61.
- LI X, QUAN H J, XU A X, et al. Differential conductance imaging of transient electromagnetic field[J]. Coalfield Geology and Exploration, 2003, 31(6): 59-61. (In Chinese)
- [3] 薛国强,宋建平,李貅. 水平层状介质下瞬变电磁成像方法[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(2):213-216.
- XUE G Q, SONG J P, LI X. Transient electromagnetic imaging method in horizontal layered media [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(2):213-216. (In Chinese)
- [4] 李超. 瞬变电磁视纵向电导微分成像应用研究[D]. 西安:长安大学,2007.
- LI C. Applied research of transient electromagnetic differential imaging of apparent longitudinal conductance [D]. Xi'an:Chang'an University, 2007. (In Chinese)
- [5] 郭文达,朱希安. 烟圈反演和视纵向电导解释方法对比[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(6):93-96.
- GUO W D, ZHU X A. Comparison of smoke ring inversion and apparent longitudinal conductivity interpretation methods [J]. Coalfield Geology and Exploration, 2014, 42(6):93-96. (In Chinese)
- [6] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙:中南大学出版社,1993.
- NIU Z L. Principle of electromagnetic method in time domain [M]. Changsha: Central South University Press, 1993. (In Chinese)
- [7] 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.
- JIANG B Y. Practical near-field magnetic source transient electromagnetic prospecting [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. (In Chinese)
- [8] 刘黎东,张富翔,张继峰,等. 基于等值反磁通的隧道 TEM 超前探测三维模拟及应用[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(06):2730-2737.
- LIU L D, ZHANG F X, ZHANG J F et al. Three-dimensional simulation and application of tunnel TEM advanced detection based on equivalent diamagnetic flux[J]. Advances in Geophysics, 2021, 36(06): 2730-2737. (In Chinese)
- [9] 严良俊,徐世浙,胡文宝,等. 中心回线瞬变电磁测深法快速电阻率成像方法及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(6):58-61.
- YAN L J, XU S Z, HU W B, et al. Fast resistivity imaging method and application of central loop transient electromagnetic sounding method [J]. Coalfield Geology and Exploration, 2002, 30(6): 58-61. (In Chinese)
- [10] 李貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2002.
- LI X. Theory and Application of transient electromagnetic sounding[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2002. (In Chinese)
- [11] 席振铎,龙霞,周胜,等. 基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(9):3428-3435.
- XI Z Z, LONG X, ZHOU S, et al. Shallow transient electromagnetic method based on the principle of equivalent antiferromagnetic flux [J]. Journal of Geophysics, 2016, 59(9):3428-3435. (In Chinese)
- [12] 杨建明,王洪昌,沙椿. 基于等值反磁通瞬变电磁法的岩溶探测分析[J]. 物探与化探, 2018, 42(4):846-850.
- YANG J M, WANG H C, SHA C. Analysis of karst detection based on equivalent counter-magnetic tran-

sient electromagnetic method [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(4): 846—850. (In Chinese)

[13] 廖圣兵, 褚平利, 段政, 等. 赣西北九岭中北部早白垩世高分异 S 型花岗岩成矿专属性分析 [J]. *河南科学*, 2020, 38(1): 69—74.

LIAO S B, CHU P L, DUAN Z, et al. Metallogenic specialization of early cretaceous highly fractionated S-type granites in Middle-northern Jiuling Mountains of Northwestern Jiangxi province [J]. *HENAN SCIENCE*, 2020, 38(1): 69—74. (In Chinese)

[14] ZHDANNOV M S, FRENKEL M A T. The solution of the inverse problems on the basis of the analytical

continuation of the transient electromagnetic field in reverse time [J]. *Geomag Geoelectr*, 1983(35): 747—765.

[15] 潘珍颖, 刘军, 甄梦阳. 冲击作用下节理岩体应力波波速衰减规律研究 [J]. *河南科学*, 2022, 40(2): 208—215.

PAN Z Y, LIU J, ZHEN M Y. Attenuation law of stress wave velocity in jointed rock mass under impact loading [J]. *HENAN SCIENCE*, 2022, 40(2): 208—215. (In Chinese)

[16] ZHDANNOV M S, TRAYNIN P N. Resistivity imaging by time domain electromagnetic migration [J]. *Exploration Geophysics*, 1995(36): 194—196.

Research on interpretation method and application of opposing coils transient electromagnetics on advanced geological forecast

ZHAO Xiaoliang¹, RAN Jun², LEI Kai¹, LIU Lidong¹,
PEI Shijian¹, ZHANG Jifeng³, ZHANG Jizhen⁴

(1. China Railway Liuyuan Group CO., LTD. Engineering Survey Institute, Tianjin 300308, China;

2. Guiyang Urban Rail Transit Group Co., LTD, Guiyang 550081, China;

3. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

4. China Railway Design Corporation, Tianjin 300251, China))

Abstract: Transient electromagnetic method is sensitive to low-resistance bodies and has unique advantages in detecting water-bearing or mud-filled faults, broken zones, and other low-resistance unfavorable geological bodies in front of the tunnel face. First, this study introduces the equivalence principle and characteristics of the Opposing Coils Transient Electromagnetics method. Then through the tunnel, the high and low resistance in the spatial domain sandwich model one dimensional forward response characteristics, the apparent resistivity curve, and the interpretation of the apparent longitudinal conductance curve characteristics and effect of comprehensive analysis and research, discusses the combined interpretation method of apparent resistivity contour map and apparent longitudinal conductivity section is discussed. Finally, two application cases summarize some characteristics and rules of Opposing Coils Transient Electromagnetic method in interpretation of tunnel advanced geological prediction results. The conclusion shows that the Opposing Coils Transient Electromagnetic method is suitable for tunnel advanced quality prediction and can effectively improve the accuracy and accuracy of prediction results.

Keywords: opposing coils transient electromagnetics; the apparent resistivity; apparent longitudinal conductance; advanced geological forecast