复杂地形条件下的瞬变电磁法勘察效果

吴有信

（安徽省煤田地质局物探测量队，安徽 宿州 234000）

摘 要：本文简述了复杂地形条件下，在隧道施工前和施工过程中，为了规避施工风险和预防施工过程中可能出现的地质灾害，运用瞬变电磁法勘察含水（泥）的断层及岩溶等水文地质问题的勘察方法。探讨了瞬变电磁法的理论基础、野外工作布置和资料处理过程。研究表明，瞬变电磁法勘探与其它常规电法相比，有许多突出的优点，它可在复杂地形条件下工作，有良好的空间分辨性。并通过实例对瞬变电磁法勘察原理、工程实践和勘察效果作了详细介绍。

关键词：复杂地形；瞬变电磁法；隧道；断层；岩溶；勘察

中图分类号：P631.3⁺25　　**文献标识码**：B

Abstract: In order to evade the construction risk and to prevent the potential geologic disasters in tunnel construction, the hydrogeogic issues such as faults and karst are investigated by using transient-electromagnetic method (TEM) in complex mountain conditions. The theoretical base, in-situ working procedure and datum processing for TEM are discussed. The study shows that the TEM is of many advantages compared with the commonly-used electric methods. The TEM could be used in complex geological conditions with the favorable space resolution rate. Through the project example the investigation principle, the engineering practice and the investigation effect of the TEM are introduced.

Key words: complex topography; transient-electromagnetic method; tunnel; fault; karst; investigation

0 前言

宜万铁路全线山高壁陡，河谷深切，岩溶广布。工程主要地质问题有岩溶、岩溶水、顺层、滑坡、崩塌、错落、断层、瓦斯、高地应力等。建设中遇到的问题比预想的更加严重。

为了规避施工风险和预防施工过程中可能出现的地质灾害，采用瞬变电磁法对隧道线路周围的含水断裂位置及岩溶发育情况进行勘察，为隧道开挖过程中规避突水突泥等地质风险提供地质依据和与隧道施工有关的地质灾害预报资料。

1 隧道概况

1.1 地形地质概况

隧道建设区属中低山地区，海拔高程 900～1600m，相对高差 100～700m，岩溶洼地、落水洞及漏斗广为分布。东部垮岩湾一带高山深切，地势陡峻，部分地段山体自然坡度达 60°左右，西部为构造溶蚀峰丛谷地，其间叠置岩溶洼地及宽缓槽谷。

隧道区岩层走向北东，倾角平缓，一般 5°～15°。从东往西依次出露地层为：泥盆系中上统砂页岩；二叠系栖霞灰岩及煤系地层、茅口灰岩、吴家坪煤系地层及长兴灰岩；三叠系大冶灰岩夹页岩及嘉陵江灰岩。隧道大部分在三叠系地层中穿过，可溶岩地层长度达 7408m，占整个隧道的 94.1%。

节理裂隙主要发育有两组：一组产状 300°～340°∠80°～90°，节理密度 1～2 条/m；另一组产状 210°～270°∠60°～80°，节理密度 2～3 条/m。前者为纵张节理，后者为横张节理，后者具明显优势。两组节理对岩溶发育有较明显的控制作用。

区内岩溶受节理裂隙控制，主要类型为溶丘洼地、岩溶槽谷、溶蚀漏斗和地下暗河等，在隧道附近有垮岩湾暗河穿过隧道，中部地表水系基本都由鸟腊河、凉风洞、小马滩等暗河入口进入地下暗河系统，是规模宏大的小溪河暗河系统上游补给区，

收稿日期：2007-05-24；**修订日期**：2007-09-20

作者简介：吴有信（1962－）男（汉族），安徽舒城人，工学学士，高级工程师.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

发育有油竹—垮岩湾暗河、小马滩—凉风洞、朱家槽—和尚鞍及道湾等四条暗河和富水溶腔，洞身位于地下水位以下，水文地质条件极为复杂。

1.2 电性特征

岩石孔隙、裂隙总是含水的，并且随着岩石的湿度或饱和度的增加，电阻率急剧下降。一般来说，含水断裂、破碎带、岩溶及地下暗河的电阻率远小于完整岩石的电阻率，其原因在于水分有不同的矿化度。这是运用瞬变电磁法评价灰岩赋水（泥）性和查找含水岩溶的物性依据。

在地形复杂和高阻屏蔽地区，磁源瞬变电磁法探测地下存在的具有导电性差异的目标体较其它常规电法有着诸多的优势。

2 瞬变电磁法工作方法

2.1 瞬变电磁法简介

瞬变电磁法是近年来国内外发展得较快、探测效果较好的一种电法勘探分支方法，在国际上被称为是电法的二次革命。该方法利用一不接地回线发射一次磁场，在一次磁场的间歇期间利用回线接收二次感应磁场，该二次电磁场是由地下良导体受激励引起的涡流所产生的非稳磁场（如图 1、图 2 所示）。与其它测深方法相比，具有探测深度大、信息丰富和工作效率高等优点。

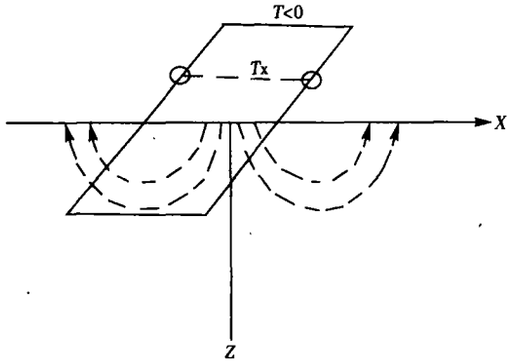


图 1 矩形回线产生的磁力线（阶跃脉冲）

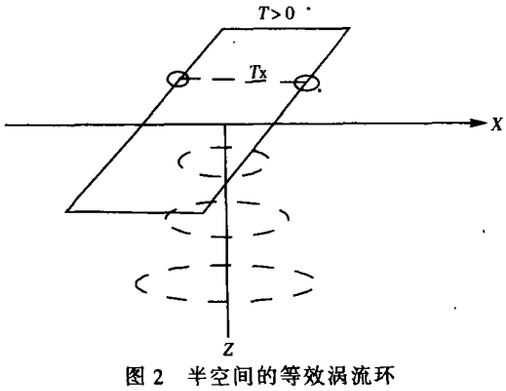


图 2 半空间的等效涡流环

涡旋场在大地中主要以扩散形式传播，在这一过程中，电磁能量直接在导电介质中传播而消耗。由于趋肤效应，高频部分主要集中在地表附近，其分布范围是源下面的局部，较低频部分传播到深处，且分布范围逐渐扩大。其传播深度和速度为：

$$d = \frac{4}{\sqrt{\pi}}\sqrt{t/\sigma\mu_0}$$

$$v_z = \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma\mu_0 t}}$$

式中：t 为传播时间；σ 为介质电导率；μ_0 为真空中的磁导率。

对于该方法的探测能力首先是要考虑瞬变电磁法的探测深度。瞬变电磁法的探测深度与发送磁距、覆盖层电阻率及最小可分辨电压有关。

由上式推导得：

$$t = 2\pi \times 10^{-7} h^2/\rho$$

式中：h 为覆盖层的厚度；ρ 为覆盖层的电阻率。

在中心回线下，时间与表层电阻率间的关系为：

$$t = \mu_0\left[\frac{(M/\eta)^2}{400(\pi\rho_1)^3}\right]^{\frac{1}{5}}$$

式中：M 为发送磁距；ρ_1 为电阻率；η 为最小可分辨电压，大小与目标层几何参数和观测时间段有关。

瞬变电磁的探测能力还包括对异常体的分辨能力。瞬变电磁的分辨能力与目标层的大小、电性异常信号与地质噪声的分离程度、电磁噪声电平等因素有关。具体为瞬变电磁系统中的电磁噪声，噪声信号限制了系统观测弱信号的能力，也与仪器功率、灵敏度和地质背景噪声有关。

2.2 勘察方法及工程布置

采用大定源回线装置，发射频率为 8.33Hz。发射线框为 500m×460m，对探测目标有较强的分辨能力，仪器为加拿大凤凰公司生产的 V8 多功能电法仪，在 2.8km 长的隧道中轴线两侧布设瞬变电磁测线 8 条，网度 10m×20m，工程量 2343 个物理点。

3 资料整理与定性定量解释

3.1 资料整理与定性解释

利用专用软件对数据进行预处理。建立原始资料数据库。在原始数据建库工作中进一步对原始数据的空间位置、数据质量进行分析与确定。要对建库的数据逐点检查、编辑、统计并进行适当的圆滑和滤波处理。

理论上讨论导电体的响应大都是假定观测面是水平的，而实际上野外的观测面大都是上、下起伏的，这种差异即是地形的影响（如图 3～图 6）。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

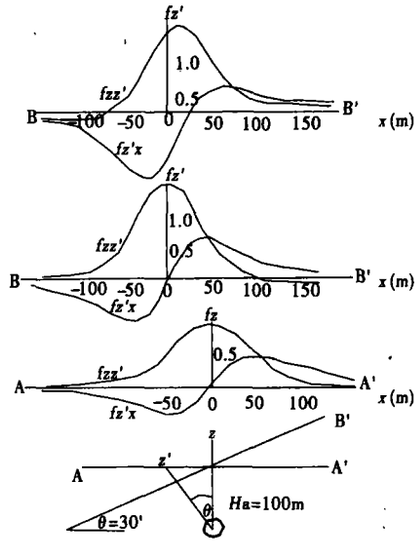


图 3　大定源回线内不同观测面和观测分量的几何函数

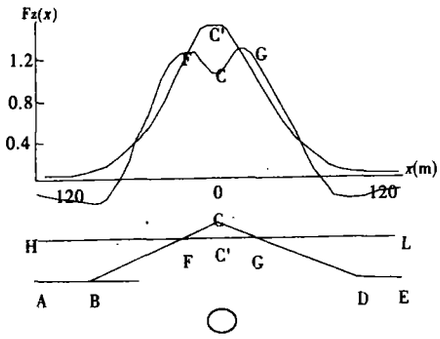


图 4　金子塔下的导电球体对大回线的响应

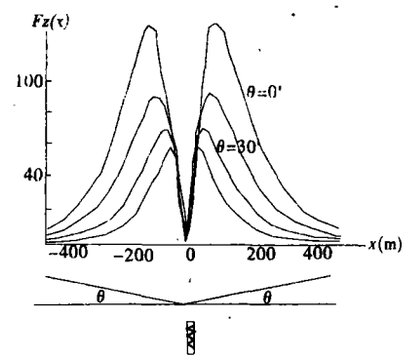


图 5　直立板状导体在山谷下的响应

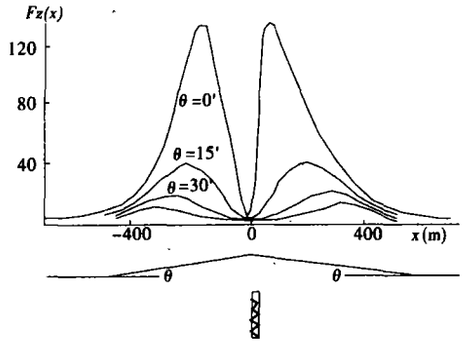


图 6　直立板状导体在山脊下的响应

在观测面水平的情况下，目前也只能计算简单几何形体的响应。计算在导电覆盖层下，导电围岩中几何体的响应也是非常复杂的，更难考虑导电覆盖层几何形态与导电不均匀性等因素之影响。不言而喻，在起伏地形下这些因素将会使响应特征变得更为复杂。幸运的是在高阻围岩下，瞬变场的晚期信号主要是由局部导体引起，地形影响可粗略地分为两大因素：几何因素和物理因素。

几何因素是指由于地形起伏，使发射回线与接收回线（或线圈）之间，以及它们与局部导体的耦合与地形水平不同引起响应改变的因素；物理因素即导电围岩以及覆盖层因地形起伏导致对响应的影响，实践表明地形影响中几何因素占主要地位。

一般来说，地形对地下导体响应的畸变不容忽视，在地形复杂的山区，单个地下导体的异常畸变，其特征相当于几个导体响应之叠加；地形的影响与地形、工作组合、异常体形状和埋深有关，就导体形状而言，等轴体比薄板状影响大。因为二次场源的轴向随激发源的轴向即激发源的方向而变，故定源方式比动源方式造成的地形影响小。

3.2　电磁测深数据的反演

Nabighian 认为感应涡流场在地表引起的瞬变电磁响应为地下各个涡流层的总效应，这种效应可以近似地用向下传播的电流环来等效。这些电流环好像是发射回线吹出的“烟圈”，其形状与发射回线相同，随着延迟时间增大而向外、向下扩大和增深。因此，计算地表瞬变电磁响应可以用某时刻地下的电流环镜像相等效。反演软件使用了简化烟圈反演和常规烟圈反演两种方法（如图 7 所示），

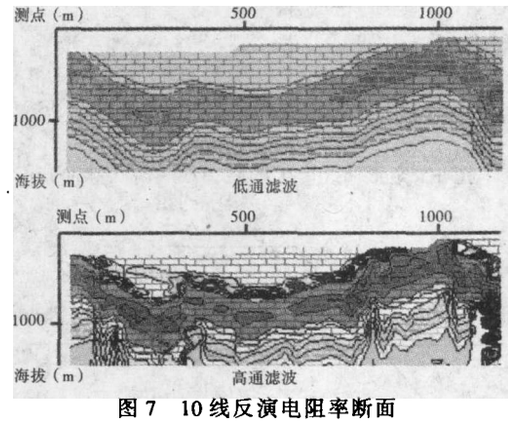


图 7　10 线反演电阻率断面

3.3　三维电性数据体的滤波与相干处理

通过研究瞬变电磁法勘察工作取得的三维电性数据体［网格为 10m × 10m × 10m］，为进一步研究电性－地质关系、地质成果提供了的前提（如图 8～图 11）。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

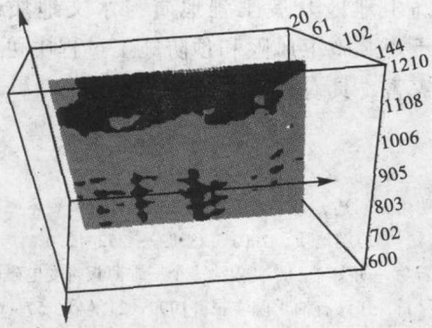


图 8　三维电性数据体段 1 相干体

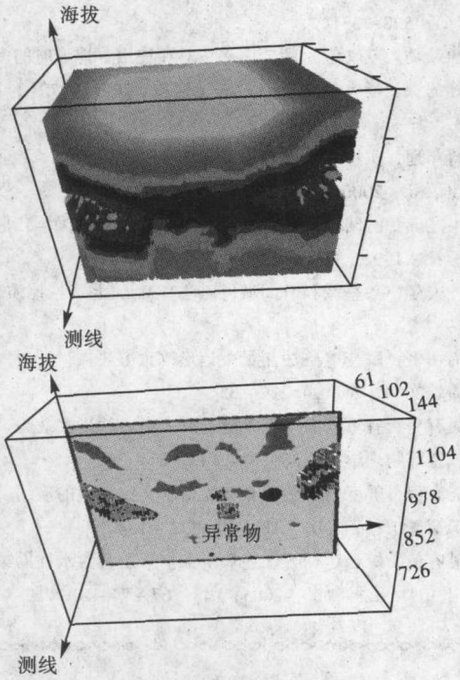


图 9　三维电性数据体段 1 及 10 线相干切片

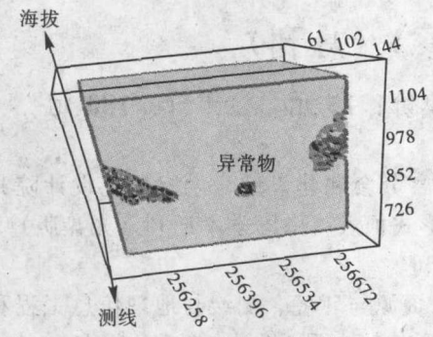


图 10　三维边缘检测体

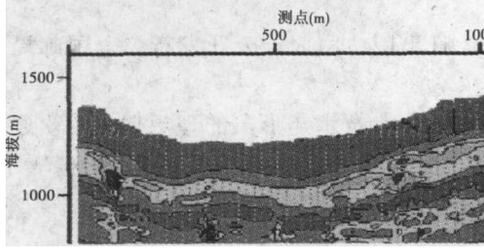


图 11　综合处理方法输出的 10 线电性断面

4　瞬变电磁勘察资料的地质成果

在对瞬变电磁场的特征进行认真分析的基础上，着重对正演模型、地形影响和局部异常及区域电性特征进行分析与研究。对含水断层、岩溶等的赋水性评价采用多测道断面图、视电阻率断面图、顺层切片、深度切片和解释性处理技术相结合的原则进行。

将转换成反映构造体物性特征的电性参数（视电阻率等）来表征地下地质体的构造特征。并且利用多种电性参数来勾画各类图件作为进一步解释分析的基础资料。

勘察区域位于长江中下游东西向、新华夏系和淮阳山子形反射弧三个一级地质构造的交汇点，形成了山高壁陡、河谷深切的地貌。通过对获取的三维电性体的全面分析，依据区域地层、勘察对象的电性特征，在充分分析工作方法中地形影响及人文干扰的基础上，获得了本区的瞬变电磁法勘察成果——隧道 10 线电性－地质剖面图和隧道 + 1000m 水平切片，见图 11 和图 12。电性资料显示，有数条斜切断层穿过线路，造成灰岩段岩石宽度与深度不等的破碎带，为岩溶的进一步发育和岩石的溶蚀提供了条件。

根据初步地质调查和掌握的地质－电性资料分析，勘察区段内自东向西主要地层分别为三叠系下统大冶组灰岩，其为中厚层灰岩夹薄层灰岩，节理较发育，地下水多为溶蚀、裂隙型水，涌水量中等；西部地层为三叠系嘉陵江组中厚层灰岩，岩溶较发育，因受构造、裂隙等作用，容易使地下水产生多方向上水力联系，给隧道建设产生破坏性影响。

全区综合多种电性参数，共解释断裂破碎带 5 条；岩溶发育区 9 处；溶蚀区段 5 块，区内较大的断裂构造有：DF1、DF2、DF3、DF4、DF5。在断裂带周围，因电磁法勘探的分辨率限制，可能发育一些规模相对较小的溶蚀区或地下岩溶水径流通道但未能发现。

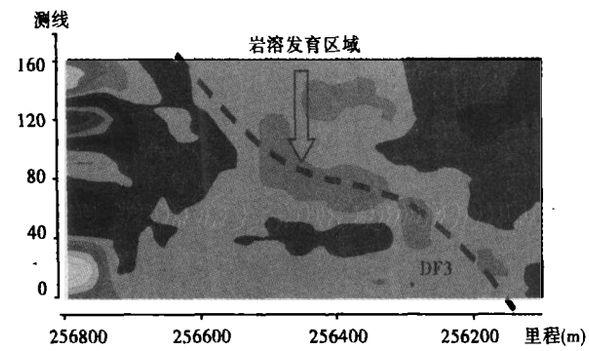


图 12　隧道 + 1000m 水平切片图（局部）

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从图 12 可以看出，勘察段内岩溶发育带多伴随有断裂构造，主要可分为三个区块：①256810～256150m；② 256150 ～ 254800m；③ 254800 ～ 254020m。其中第二块段岩溶最为发育，伴随断裂构造有多处岩溶发育，该块段的电性资料显示，它与第一区块岩溶区有地下水水力联系。

工程施工过程中的水文地质与工程地质调查孔马 3、马 4 对 DF1、DF2、DF3 号溶蚀区进行了验证，隧道出口段施工中揭露了 DF4 溶蚀区（地下暗河），说明瞬变电磁法勘察地质效果明显。

5 结论

瞬变电磁法是基于电性差异来划分不同岩性地层、构造破碎带等异常地质体的一种电法勘探方法。瞬变电磁法（TEM）属于时间域的电磁感应法，因瞬变曲线衰减的快慢与地层或地质体的导电性能有关，可根据这一特性利用其异常值区分勘探区内的地质构造和水文地质情况。

瞬变电磁法的应用受地形因素的影响较小。由于瞬变电磁法是观测断电后的纯感应二次场，而地形几何因素影响的主要是一次场，本法不观测一次场，所以一般不受或很少受地形因素的影响。因此通过加大发射功率，采用多次叠加技术能够提高采集信号的可信度。

工程实践说明，瞬变电磁法适宜在复杂地形条件下的高阻地区开展工程地质与水文地质勘察工作，对于规避施工风险和预防施工过程中可能出现的地质灾害，具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 陈明生，阎述，石显新等．二维地质体的瞬变电磁场相应特征［J］．地震地质，2001，23（2）：252～256．

[2] 唐新功，胡文宝，严良俊．多个三维薄板瞬变电磁响应的比较［J］．江汉石油学院学报，1999，21（4）：57～61．

[3] 唐新功，胡文宝，严良俊．瞬变电磁法对地下不同位置多个三维薄板探测能力的研究［J］．物探与化探，2004，28（6）：528～531．

[4] 唐新功，胡文宝．瞬变电磁法对存在山谷地形时的多个异常体的探测能力研究［J］．地震地质，2005，27（2）：316～323．

[5] 蒋邦远．实用近区磁源瞬变电磁法勘探［M］．北京：地质出版社，2000．

[6] 牛之琏．时间域电磁法原理［M］．长沙：中南工业大学出版社，1992．

[7] 考夫曼．频率域和时间域电磁法［M］．北京：地质出版社，1987．

[8] 周明平．瞬变电磁法测量中地形改正方法探讨［J］．贵州地质，2004，21（2）、32～35．

[9] 吴有信．宜万铁路马鹿箐隧道瞬变电磁法勘察效果［J］．工程地球物理学报，2007，4（1）：21～26．

[10] 吴有信．瞬变电磁法及其在煤矿水文物探中的应用［J］．西部探矿工程，2006，18（4）：132～134．

[11] 吴有信．综合物探方法在煤矿采空区及其含水性勘察中的应用［J］．工程勘察，2005，（4）：67～71．

征订启示

中文核心期刊《工程勘察》（月刊）

刊号：CN11-2025/TU　邮发代号：2—832　单价：15 元　全年价：180 元

《工程勘察》杂志创刊于 1973 年，由中国建筑学会工程勘察分会和建设综合勘察研究设计院共同主办，为中文核心期刊。自 1998 年起，《工程勘察》杂志以整体形式加入《中国学术期刊（光盘版）》（CAJ－CD），1999 年起加入“Chinainfo 网络信息资源系统”电子期刊。

《工程勘察》杂志涵盖四大专业：岩土工程与工程地质、水资源与环境、测绘与地理信息工程和工程物探，一直以刊登技术交流方面的文章见长，适合于四大专业的广大科研、设计、教学、施工等技术人员阅读与收藏。

《工程勘察》杂志为大 16 开本，2006 年起改为月刊，每月 1 日出版，国内外公开发行，全国邮局均可订阅，也可直接向编辑部订阅。

《工程勘察》杂志兼营广告，收费合理，具有一定规模，是展示企业技术与形象的理想舞台，欢迎相关企业惠顾。

本刊地址：北京市东城区东直门内大街 177 号　　邮编：100007

联系电话：010—64043313　　010—64013366—108

E－mail：wjzhou@geot.com.cn；gckczz@cigis.com.cn；newsroom@geot.com.cn

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net