

传统瞬变电磁法的改进及其在隧道超前地质预报中的应用

伍小刚, 李天斌, 张 中, 薛德敏

Improvement of the traditional transient electromagnetic method and its application to advanced geological forecast of tunnel

WU Xiaogang, LI Tianbin, ZHANG Zhong, and XUE Demin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

盾构地铁隧道穿越既有铁路桥的沉降分析

An analysis of the settlement of a shield tunnel passing under the operating railway bridge

于德海, 舒娇娇, 秦凯凯 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 148–152

深埋顺层偏压隧道围岩破坏机理及规律研究——以郑万线某隧道为例

A study of the mechanism and regularity of failures in the surrounding rock of a deep buried bias tunnel embedded in geologically bedding strata: taking one tunnel of the Zhengwan line as an example

胡炜, 谭信荣, 蒋尧, 毛坚强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 60–68

广昆铁路复线秀宁隧道大皮坡一中村段岩溶塌陷成因

An analysis of the cause of karst collapses near the Dapipo–Zhongcun section of the Xiuning tunnel of the Guangzhou–Kunming railway

周长松, 邹胜章, 朱丹尼, 谢浩, 申豪勇, 王佳 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 146–146

鸿图嶂隧道突涌水预测及防治措施

Prediction and prevention of sudden water gushing in the Hongtuzhang tunnel

罗依珍, 成国文, 尹利君, 邓皇适, 谭宁, 刘真真 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 64–72

隧道施工期岩爆危险性评价的属性识别模型及工程应用

Attribute recognition model of fatalness assessment of rockburst in tunnel construction and its application

何怡帆, 李天斌, 曹海洋 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 102–111

改性糯米灰浆的室内研究及在九寨沟钙华地质裂缝修复中的应用

A laboratory study of modified glutinous rice mortar and its application to repair travertine geological cracks in Jiuzhaigou

范明明, 裴向军, 杜杰, 肖维阳, 周立宏, 杨华阳 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 183–190



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003025](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003025)

传统瞬变电磁法的改进及其在隧道超前地质预报中的应用

伍小刚, 李天斌, 张 中, 薛德敏

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 为保证施工人员和设备的安全, 在隧道开挖过程中需要掌握掌子面前方含水不良地质体的发育情况。较为常用的探测含水不良地质体的物探方法为传统瞬变电磁法。由于以往没有重视探测装置与地质体间的耦合关系, 传统瞬变电磁法沿单一测线进行数据采集的方式只能从单一角度发射磁场从而获得单一角度的探测结果, 因此一直存在预报不准、漏报等问题。为了克服上述问题, 提高预报的准确性, 文章对传统瞬变电磁法进行了改进。基于探测装置与地质体间的良-强耦合关系, 提出了一种能从水平和竖直方向进行多角度探测的共轴偶极法, 通过转动探测装置从多个角度发射磁场, 使单一角度无法探测的地质体也能与磁场达到良-强耦合效果, 从而降低预报不准、漏报的可能性。共轴偶极法具有多个角度的探测结果, 多个结果相互印证, 具有比传统方法更高的准确性。在九绵高速公路天池隧道里程为 YK223+135—YK223+035 段内进行传统方法和共轴偶极法预报, 开挖验证表明共轴偶极法对含水节理裂隙和岩溶裂隙等含水不良地质体的预报准确性比传统方法高, 可为类似隧道超前地质预报工作提供一定参考。

关键词: 隧道; 超前地质预报; 瞬变电磁法; 共轴偶极; 含水不良地质体

中图分类号: U452.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)01-0163-08

Improvement of the traditional transient electromagnetic method and its application to advanced geological forecast of tunnel

WU Xiaogang, LI Tianbin, ZHANG Zhong, XUE Demin

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: In order to ensure the safety of construction personnel and equipment during tunnel excavation, it is necessary to master the development of water-bearing poor geological bodies in front of the tunnel face. The most commonly used geophysical exploration method to detect water-bearing poor geological bodies is the traditional transient electromagnetic method. Since no attention has been paid to the coupling relationship between the detection devices and the geological bodies, the traditional transient electromagnetic method for data acquisition along a single survey line can only launch a magnetic field from a single angle to obtain the detection results from a single angle. Therefore, problems such as inaccurate forecast and missed forecast have always existed. In order to overcome the above problems, improve the accuracy of forecast, the traditional transient electromagnetic method is improved in this paper, based on the well-strong coupling relationship between the detection devices and the geological bodies, a coaxial dipole method with multi-angle detection from horizontal and vertical directions is proposed. By rotating the detection devices to emit magnetic field from multiple angles, the geological bodies that cannot be detected from a single angle can also achieve a well-strong coupling effect with the magnetic field, thus reducing the possibility of inaccurate forecast and missed forecast. The coaxial dipole

收稿日期: 2020-03-12; 修订日期: 2020-05-11

第一作者: 伍小刚(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程研究。E-mail: 995137242@qq.com

通讯作者: 李天斌(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事地质工程、岩土工程和隧道工程领域的教学和科研工作。E-mail: lfb@cdu.edu.cn

method has more accuracy than the traditional method because of its multi-angle detection results. The traditional method and the coaxial dipole method were used to forecast in Tianchi tunnel in Jiumian expressway from YK223+135 to YK223+035. The excavation verification shows that the accuracy of the coaxial dipole method for water-bearing poor geological bodies such as water-bearing joints and karst fractures is higher than that of the traditional method. This method can provide some references for similar tunnel advanced geological forecast.

Keywords: tunnel; advanced geological forecast; transient electromagnetic method; coaxial dipole method; water-bearing poor geological bodies

道路交通工程建设中经常需要修建隧道,隧道工程具有隐蔽性,隧址区可能存在含水不良地质体,隧道开挖遇到含水不良地质体时若防治措施不到位容易引发严重的地质灾害,可能造成巨大的经济损失甚至危及人身安全。因此查明隧址区含水不良地质体的发育情况,及时采取防治措施可有效避免人身伤害,减小经济损失。隧道施工前的勘察资料一般是对隧址区和沿隧道轴线的宏观地质条件进行描述,无法查明含水不良地质体的分布特征和赋水特征。因此,开展超前地质预报工作对含水不良地质体的探测具有重要意义,对含水不良地质体的成功预报能科学指导隧道安全施工,为工程建设保驾护航。

瞬变电磁法是地质勘探物探法之一。1978 年加拿大 Geonics 公司开始研发瞬变电磁仪 (PROTEM),通过激发磁场对地质体充电使之产生涡流,涡流激发的二次磁场被接收,以此获得地质信息。我国从 20 世纪 70 年代初开始研究瞬变电磁法,之后逐步将其应用于工程实践。瞬变电磁法对地下水具有较强的敏感度,常用于勘探地下水源、岩溶发育区、含水节理裂隙发育带等^[1-4]。目前瞬变电磁法在隧道超前地质预报中已取得一定成果,李貅等^[5]通过对长函子隧道进行探测,证明了瞬变电磁法对低阻含水断层、充泥充水溶洞、含水含泥破碎带等不良地质体反应灵敏。段铮等^[6-8]在铜锣山隧道、明月山隧道和紫平铺隧道进行瞬变电磁法解译研究,初步建立了一套瞬变电磁法图件解译标志。谭代明等^[9]为探明沪蓉高速公路某隧址区断层中地下水发育情况,用瞬变电磁法进行超前地质预报,发现了较大范围的低阻异常区;接近异常区时,进行钻孔验证,最大涌水量达 $116 \text{ m}^3/\text{h}$ 。余东俊等^[10-11]总结了瞬变电磁法的常见干扰因素,并建立了图件解译的一般规则。Li Shucai 等^[12]、沈晓钧等^[13]在沪蓉西高速公路、锦屏二级水电站和胶州湾海底隧道的超前地质预报工作中总结出探地雷达法和瞬变电磁法相结合可准确预测地下水的经验。孟陆波等^[14]在华蓥山公路隧道超前地质预报工作中揭示了溶蚀裂隙区域视电阻率等值线存在局部闭合

的规律。秦浩靖等^[15]准确预报出平阳隧道的含水裂隙发育带,指导安全施工。

以上成果可为隧道工程建设提供宝贵的经验,但这些成果均是采用沿单测线进行测试的传统瞬变电磁法取得的,传统瞬变电磁法不注重观测装置和地质体之间的耦合性,易出现弱耦合或零耦合现象,易导致预报不准或漏报。叶展荣^[16]对掌子面前方地质情况按照传统方法测试,在掌子面边墙处以 15° 为角度间隔水平转动线圈,将探测方向从平行隧道轴线的方向逐步转向垂直隧道轴线的方向,增加了对隧道两侧地质情况的探测,对提高预报准确性有一定帮助,对以转动观测装置进行探测的方式有一定启发,但仍只在水平方向进行多角度测试,竖直方向角度没有变化。

共轴偶极法通过转动装置从竖直和水平两个方向进行多角度探测,与传统方法相比耦合效果更好;多个角度的探测结果相互印证具有比传统方法更高的准确性。本文采用传统方法和瞬变电磁共轴偶极法对天池隧道同一里程段的含水不良地质体进行测试,开挖结果证明共轴偶极法对含水不良地质体的预报准确性比传统方法要高。

1 工程概况

1.1 工程背景

九绵高速公路全长 212 km, 预算总投资约 400 亿人民币, 计划工期为 6 年, 预计 2021 年年底正式通车。九绵高速公路起于四川省绵阳市游仙区东林镇张家坪, 途经绵阳市、江油市、北川县、平武县、九寨沟县, 止于九寨沟县城南, 是连接绵阳和九寨沟的交通要道, 隧道占比大, 沿线脆弱的生态环境和复杂的地质条件使隧道施工面临严峻考验。

1.2 工程地质概况

九绵高速公路天池隧道隧址区跨越江油市太平镇边界沟村及天池村, 左线起止里程范围为 ZK223+305—ZK222+403, 共 902 m; 右线起止里程范围为 YK223+295—YK222+401, 共 894 m。隧址区属于山

区,地质情况复杂,丰富的年降水量为隧址区地下水提供补给,岩溶发育,可能存在两处断层破碎带,隧道开挖易出现涌水、突泥、塌方等地质灾害。

2 瞬变电磁法原理

2.1 基本原理

瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Method, 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,一次电磁场衰减使地质体中产生涡流,用线圈或接地电极观测由该脉冲电磁场感应的涡流衰减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。其原理见图1,图中Tx为接收线圈,Rx为发射线圈。

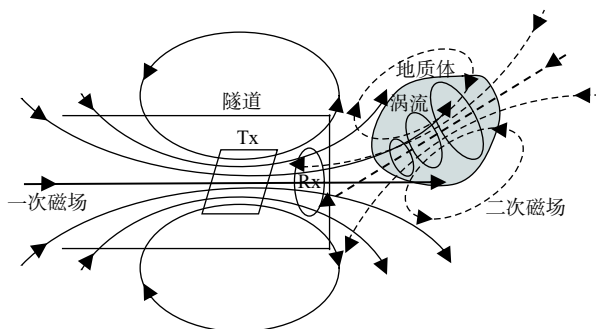


图1 瞬变电磁法原理

Fig. 1 Principle of transient electromagnetic method

隧道四周都是围岩,这种环境适合运用让整个空间都为瞬变电磁作出响应的全空间瞬变电磁法,全空间瞬变电磁法早期和晚期视电阻率(ρ_T)的计算公式如下:

$$\rho_T = \frac{6.32 \times C \times S^{2/3} \times s^{2/3}}{U^{2/3} \times t^{5/3}} \quad (1)$$

式中: C ——全空间响应系数;

S ——发射线圈等效面积/ m^2 ;

s ——接收线圈等效面积/ m^2 ;

U ——接收的归一化二次场电位/V;

t ——接收的二次场衰减时间/ μs 。

晚期涡流场在围岩中传播深度 H 的计算公式如下:

$$H = 0.61(I/S/\eta)^{1/5} \quad (2)$$

式中: I ——发射机电流/A;

S ——发射线圈等效面积/ m^2 ;

η ——未供电激励时接收回线单位面积接收到的干扰信号。

2.2 地质解译

瞬变电磁法获得的成果是以探测宽度为横坐标,以探测深度为纵坐标的视电阻率等值线图。需根据

视电阻率等值线特征、视电阻率值和坐标来判断地质情况和推测不良地质体位置,解译原则为:视电阻率与地质体含水率呈负相关,即视电阻率越大则地下水越不发育,视电阻率越小则地下水越发育。典型的不良地质体解译如下:

(1)断层:干断层视电阻率等值线基本平行,分布稀疏,视电阻率值较大。含水断层视电阻率等值线形态依情况而定,视电阻率值较小,总体符合断层两侧大、中间小的规律。

(2)溶洞:干溶洞(空腔)视电阻率等值线基本平行,若周围地下水发育则视电阻率等值线易形成近似沿溶洞边界且中部视电阻率大而周围视电阻率小的闭合形态。充水(泥夹石)溶洞视电阻率等值线也易形成闭合形态,但中部视电阻率小而周围视电阻率大。

(3)溶隙、裂隙:视电阻率等值线形态依溶隙、裂隙发育形态而定,一般较杂乱,视电阻率较小。

3 基于良-强耦合性的共轴偶极法

3.1 耦合性探讨

地质体在空间的展布情况具有复杂性,不同形态的地质体与磁场耦合情况不同。一般情况下,边界比较平滑、形态比较立体的地质体更容易被磁感线穿越,达到良好的耦合效果;如果边界比较粗糙、形态比较扁平,地质体与磁感线近乎平行或平行,耦合效果会下降甚至达到零耦合状态,地质体与磁感线耦合情况如图2所示。

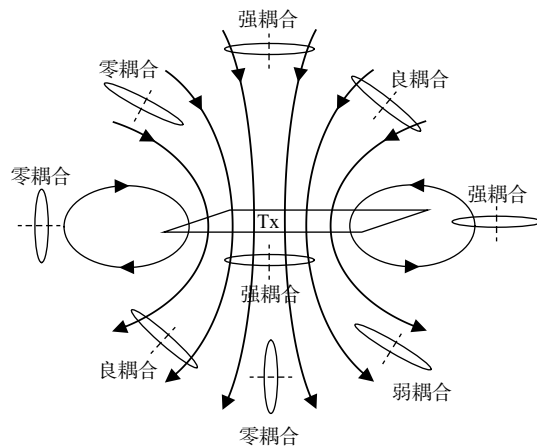


图2 磁感线与地质体耦合示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the coupling of magnetic inductance lines and geological bodies

3.2 传统方法的不足

耦合效果直接影响数据的有效性,传统方法是将发射线圈和接收线圈安装在同一支架上^[7,10],将支架贴近掌子面(图3),逐步移动支架进行数据采集。

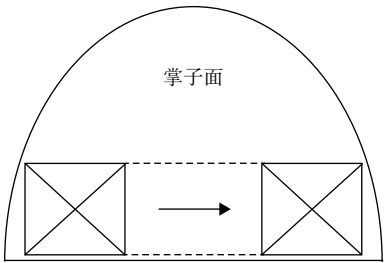


图 3 测线布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of line survey layout

由于传统方法的测试角度单一,地质体与磁场容易出现弱耦合甚至零耦合现象,可能导致预报不准的情况^[6-7, 11, 13],如表 1 所示。

3.3 共轴偶极法

为了尽可能避免磁感线与地质体出现弱耦合或者零耦合现象,需对地质体进行多角度探测^[17-21],即多次旋转线圈使得磁场与地质体达到良好的耦合效果。本文考虑隧道工作环境的影响,选择共轴偶极法进行多角度测试,将接收线圈(Rx)贴近掌子面放置,发射线圈(Tx)在 Rx 后方 10 m 左右, Tx 和 Rx 都位于隧道轴线上,将 Tx 和 Rx 在水平和竖直方向同时转动相同角度(两者保持平行),如图 4 所示。将线圈旋转角度设定为:(1)水平方向旋转角度依次为左 45°、左 30°、左 15°、0°、右 15°、右 30°、右 45°;(2)每一个水平方向角度对应 7 个竖直方向旋转角度,即当水平方向角度确定时, Tx 和 Rx 的竖直方向旋转角度依次为上 45°、上 30°、上 15°、0°、下 15°、下 30°、下 45°。

多角度测试能尽可能使磁感线和地质体达到较好的耦合效果,角度分布如图 5 所示。

4 现场探测与数据解译

4.1 探测区地质概况

选择九绵高速公路天池隧道 YK223+135—YK223+035 进行现场探测。该里程段内工程地质资料如下:

YK223+135—YK223+101 段内表层为含碎石粉质黏土约厚 0.5 m,下为石灰岩,局部溶蚀严重,岩溶裂隙较发育,岩体较破碎;局部夹岩溶裂隙带。隧道围岩为可溶岩,隧道开挖遇溶洞可能性较大,岩溶裂隙水量较丰富,以点滴状和淋雨状出水为主,局部呈涌流状,围岩设计等级为 V 级。

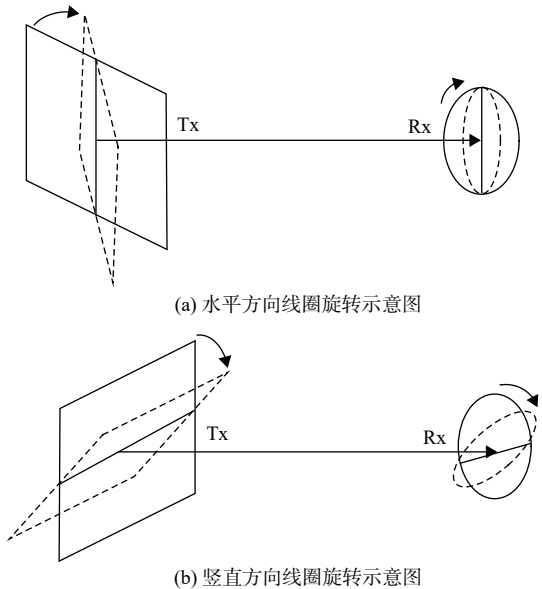


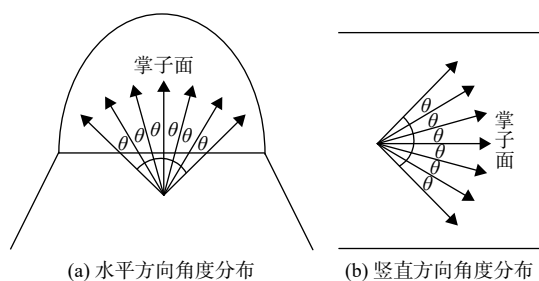
图 4 线圈旋转示意图

Fig. 4 Schematic diagram of coil rotation

表 1 传统方法案例

Table 1 Traditional approach cases

隧道	里程范围	预报情况	实际情况	准确度
明月峡隧道	YK26+535—YK26+526	岩体较完整,岩溶弱发育	岩体较破碎	差
	YK26+526—YK26+510	岩体较完整,岩溶弱发育	岩体较破碎,湿润-滴水	差
	YK26+510—YK26+502	岩体破碎,岩溶裂隙发育	岩体破碎,湿润-滴水,局部为线状流水。	一般
	YK26+502—YK26+490	存在溶洞,可能突泥和裂隙涌水	存在岩溶裂隙,局部存在突泥现象,滴水-局部线状出水	一般
	YK34+482—YK34+277	围岩稳定性较差,地下水呈渗水状	岩体呈松软结构,地下水呈淋水状	一般
铜锣山隧道	YK34+519—YK34+554	围岩稳定性较差,地下水可能为小股状裂隙水	岩体呈块碎状结构,地下水呈潮湿-滴水状	一般
	YK34+554—YK34+589	围岩稳定性较差,地下水可能为线状	围岩较破碎,地下水呈潮湿-滴水状,局部呈线状	一般
	YK34+589—YK34+624	围岩稳定性较差,存在裂隙水	围岩较破碎,地下水呈潮湿-滴水状,局部呈线状	一般
	YK34+624—YK34+659	围岩稳定性较差,地下水可能为线状	围岩较破碎,地下水呈潮湿-滴水状,局部呈线状	一般
	YK34+659—YK34+694	围岩稳定性较差,存在裂隙水	围岩较破碎,地下水呈潮湿-滴水状	一般
引汉济渭秦岭隧洞	K10+085—K10+065	围岩裂隙较发育,裂隙水较发育	岩体破碎,渗水	一般
	YK6+813—YK6+808	存在岩溶裂隙水,滴水,线状出水	裂隙一般发育,局部渗水	一般
	YK6+783—YK6+793	岩体破碎,存在裂隙水,线状出水	裂隙较发育,局部渗水	一般
	YK7+177—YK7+092	存在岩溶裂隙水,小股状涌水	节理裂隙一般发育,渗滴水	一般
	YK7+079—YK7+009	存在岩溶裂隙流水,线状出水	节理裂隙发育,局部渗水	一般



(a) 水平方向角度分布 (b) 竖直方向角度分布

图 5 共轴偶极法角度分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the angular distribution of the coaxial dipole method

YK223+101—YK223+035 段内隧道围岩为泥灰岩,为软硬岩互层,软岩为主,岩体较完整~破碎,中薄层状结构。岩溶裂隙水量较丰富,以点滴状和淋雨状出水为主,局部呈涌流状,围岩设计等级为 IV 级。

4.2 现场工作

现场采用 PROTEM CM 收发一体式瞬变电磁仪,包括直径 0.61 m 的接收线圈 Rx、边长为 1 m 的正方形发射线圈 Tx、收发一体式瞬变电磁仪主机、两根电缆线,硬件组成见图 6。



图 6 PROTEM CM 瞬变电磁仪

Fig. 6 PROTEM CM transient electromagnetic instrument

为了将传统方法和共轴偶极法的预报成果进行对比,在测试段内进行两种方法探测。传统方法:将发射线圈紧贴接收线圈,面对并贴近掌子面以间距为 0.5 m 的距离从左往右移动线圈进行数据采集。共轴偶极法:按照设定角度旋转线圈进行数据采集。

现场工作主要步骤如下:(1)将开挖台车和其它大型器械移动到掌子面后方 50~100 m 的位置,尽量避免金属对电场和磁场产生干扰。(2)将发射线圈 Tx 放置在掌子面后方 10 m 左右的位置,接收线圈 Rx 尽量靠近掌子面,通过电缆线将 Tx 和 Rx 分别与主机相连。(3)按照传统方法和共轴偶极法的操作方式进行探测。

4.3 数据处理和解译

通过 ReaTEM 软件进行数据处理, Surfer 软件出

图,得到成果如图 7~8 所示,步骤主要如下:

(1)废道剔除:将与相邻数据差异较大的数据和信号波动较大的数据视为干扰,应剔除,避免干扰扩

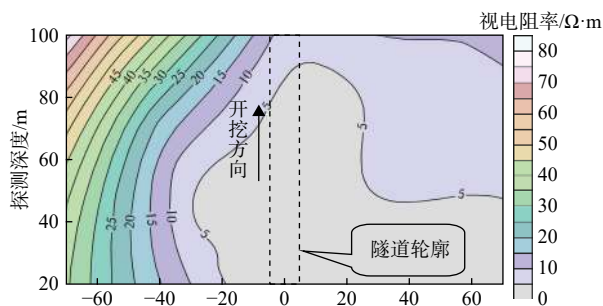
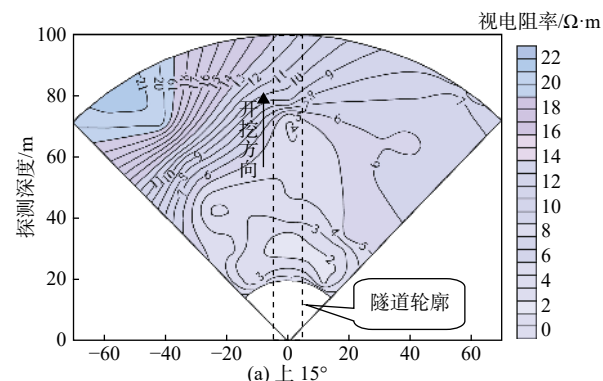
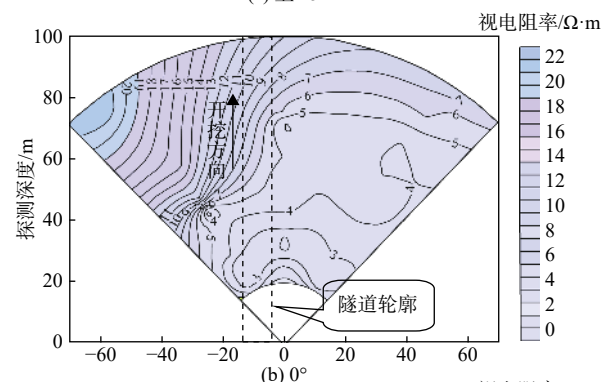


图 7 YK223+135—YK223+035 传统方法测试结果

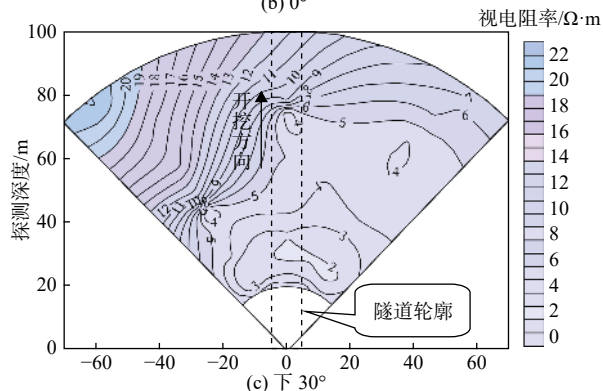
Fig. 7 Traditional method test results of YK223+135—YK223+035



(a) 上 15°



(b) 0°



(c) 下 30°

图 8 YK223+135—YK223+035 共轴偶极法测试结果

Fig. 8 Test results of coaxial dipole of YK223+135—YK223+035

散至其他测道。

(2)滤波:手动滤波或者软件自动滤波,从而提高信噪比。

(3)视电阻率计算:对剔除和滤波后的数据进行视电阻率计算。

(4)出图:处理好的数据通过 Surfer 软件生成视电阻率等值线图。

传统方法的成果是一幅视电阻率等值线图;若不进行步骤(1),共轴偶极法的成果是 7 幅视电阻率等值线图,本次测试数据剔除干扰后的成果是竖直角度为上 30°、0°和下 15°对应的视电阻率等值线图。

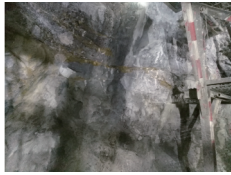
受到掌子面附近钢拱架等的干扰,掌子面前方约

20 m 范围内的信号不稳定,因此舍弃此段内的数据。

为了验证两种方法的预报准确性,隧道开挖后,对探测结果进行了验证,隧道开挖揭示的地质情况如表 2 所示。从表 2 中可以看出共轴偶极法预报含水不良地质体的准确度比传统方法高,特别是在 YK223+115—YK223+045 段内,传统方法探测结果是岩体较完整,存在渗、滴水现象;共轴偶极法探测结果是存在岩溶裂隙、小股状流水和存在渗、滴水现象。实际情况是岩体较破碎,节理裂隙发育,局部存在岩溶裂隙,存在多处小股状流水,局部存在渗、滴水现象,与传统方法探测结果存在显著差别,与共轴偶极法探测结果相符。

表 2 解译与开挖验证

Table 2 Interpretation and excavation verification

预报里程	解译		开挖验证	准确度	
	传统方法	共轴偶极法		传统方法	共轴偶极法
YK223+115—YK223+060	视电阻率为 0~5 Ω·m, 推测此段内岩体较完整,可能出现小股状流水	图8(a)(b)(c)视电阻率等值线稀疏,不平行。图8(a)视电阻率为 0~5 Ω·m,图8(b)为 2~5 Ω·m,图8(c)为 2~5 Ω·m,推测此段内存在岩溶裂隙,可能出现小股状流水	 YK223+115  YK223+095 YK223+115、YK223+095 岩性主要为中等-强风化灰岩,局部为砾岩,产状为 319°∠65°,岩体较破碎,节理裂隙局发育,局部存在岩溶裂隙,存在多处小股状流水,局部存在渗、滴水现象	一般	高
YK223+060—YK223+045		图8(a)(b)(c)视电阻率等值线稀疏,不平行。图8(a)视电阻率为 5~12 Ω·m,图8(b)为 5~10 Ω·m,图8(c)为 5~12 Ω·m,推测此段内岩体较破碎,存在渗、滴水现象	 YK223+060  YK223+055 YK223+060、YK223+055 岩性主要为中等-强风化灰岩,局部为砾岩和砂岩,产状为 310°∠71°,岩体较破碎,局部节理裂隙局发育,整体存在渗、滴水现象	一般	高
YK223+045—YK223+035	视电阻率等值线稀疏,基本平行,视电阻率为 5~10 Ω·m,推测此段内岩体较完整,可能出现渗、滴水现象		 YK223+045  YK223+035 YK223+045、YK223+035 岩性主要为中等-强风化灰岩,局部为砾岩和砂岩,产状为 313°∠75°,局部破碎,整体存局在渗、滴水现象	高	高

5 结论与建议

(1)瞬变电磁共轴偶极法是将发射线圈和接收线

圈平行放置,二者均位于隧道轴线上,通过旋转线圈对隧道掌子面前方地质情况进行水平和竖直两个方向多角度探测。

(2)瞬变电磁共轴偶极法比传统方法具有操作简单(原地转动线圈进行数据采集)、强耦合性(通过多角度测试提高了磁场与含水不良地质体的耦合性)、准确度高(本文成功探测到含水节理裂隙和岩溶裂隙的位置和出水状态)等特点。

(3)对天池隧道岩溶裂隙含水不良地质体的预报结果表明传统方法存在预报不准的情况,本文改进的共轴偶极法预报结果与实际开挖情况一致。

(4)瞬变电磁共轴偶极法在现场操作和成果解译方面比传统方法更具优势,如果减小线圈每次旋转的角度,增加探测数据的道数,可能探测到更详细的含水不良地质体信息,从而提高预报准确性。

参考文献 (References) :

- [1] 吕晓俭,李宇.北京市通州区龙旺庄隐伏灰岩水源地勘查与评价研究[J].水文地质工程地质,1999,26(2):17-21. [LYU Xiaojian, LI Yu. Exploration and evaluation of concealed limestone water sources in Longwangzhuang, Tongzhou district, Beijing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1999, 26(2): 17-21. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 武毅,郭建强,朱庆俊.宁南深埋岩溶水勘查的物探新技术[J].水文地质工程地质,2001,28(2):45-48. [WU Yi, GUO Jianqiang, ZHU Qingjun. Application of new techniques in the exploration of Ningnan deep-seated karst water[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2001, 28(2): 45-48. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 薛云峰,孙晓曦,孙雅芳.瞬变电磁电阻率成像法探测岩体渗漏通道的研究及应用[J].水文地质工程地质,2004,31(3):96-98. [XUE Yunfeng, SUN Xiaotun, SUN Yafang. Transient electromagnetic resistivity imaging formation in detecting rock seepage passage[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(3): 96-98. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 时哈.综合物探方法在厚覆盖层地区勘查地下水源的应用实例[J].水文地质工程地质,2005,32(5):101-104. [SHI Han. Application of comprehensive geophysical method in exploration of groundwater sources in thick overburden areas[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(5): 101-104. (in Chinese)]
- [5] 李貅,武军杰,曹大明,等.一种隧道水体不良地质体超前地质预报方法——瞬变电磁法[J].工程勘察,2006,34(3):70-75. [LI Xiu, WU Junjie, CAO Daming, et al. Advanced geologic forecasting for unfavorable geological body with tunnel water——transient electromagnetic method[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006, 34(3): 70-75. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 段铮.瞬变电磁法在隧道超前地质预报中的应用及解译分析[D].成都:成都理工大学,2008. [DUAN Zheng. The application of TEM in tunnel fore geological forecast and its interpretation methods[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 段铮,李天斌,李育枢,等.瞬变电磁法超前地质预报技术在铜锣山隧道中的应用[J].现代隧道技术,2008,45(2):58-62. [DUAN Zheng, LI Tianbin, LI Yushu, et al. Application of TEM for geologic prediction at Tongluoshan tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(2): 58-62. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 段铮,李天斌.瞬变电磁法隧道超前地质预报技术的应用[J].山西建筑,2009,35(36):326-327. [DUAN Zheng, LI Tianbin. The application of transient EM method tunnel advanced geological forecast[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(36): 326-327. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 谭代明,漆泰岳,刘传利.隧道全空间瞬变电磁响应的研究与应用[J].水文地质工程地质,2009,36(3):111-116. [TAN Daiming, QI Taiyue, LIU Chuanli. Research on the transient electromagnetic response in tunnel whole space and its application[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(3): 111-116. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 余东俊.瞬变电磁法(TEM)在隧道超前预报中的应用和效果研究[D].成都:成都理工大学,2010. [YU Dongjun. The application of transient electromagnetic methods(TEM) in the tunnel advanced forecast and its effect research[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 余东俊,黄磊,张玮.瞬变电磁法超前地质预报技术在明月峡隧道中的应用[J].勘察科学技术,2010(2):48-50. [YU Dongjun, HUANG Lei, ZHANG Wei. Application of transient electromagnetic method in advance geologic prediction technique of Mingyuxia tunnel[J]. Site Investigation Science and Technology, 2010(2): 48-50. (in Chinese with English abstract)]
- [12] LI Shucai, LI Shuchen, ZHANG Qingsong, et al. Predicting geological hazards during tunnel construction[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(3): 232-242.

- [13] 沈晓钧,王智阳,余凯,等.综合超前预报法在引汉济渭秦岭隧洞中的应用[J].[人民黄河](#),2017,39(12):139-141. [SHEN Xiaojun, WANG Zhiyang, YU Kai, et al. Application of comprehensive prediction method in tunnel of Qinling in Hanjiang-to-Weihe river valley water diversion project[J]. [Yellow River](#), 2017, 39(12): 139-141. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 孟陆波,李天斌,段铮,等.瞬变电磁法对隧道含水不良地质体的探测规律[J].[公路](#),2011,56(5):214-218. [MENG Lubo, LI Tianbin, DUAN Zheng, et al. Regularity of transient electromagnetic methods for detecting hydrous unfavorable geological body in tunnel[J]. [Highway](#), 2011, 56(5): 214-218. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 秦浩靖,何习平,相斌辉,等.全空间瞬变电磁法在平阳隧道超前预报中的应用研究[J].[南昌工程学院学报](#),2019,38(3):46-49. [QIN Haojing, HE Xiping, XIANG Binhui, et al. Application research of full-space transient electromagnetic method in advanced geological prediction of Pingyang Tunnel[J]. [Journal of Nanchang Institute of Technology](#), 2019, 38(3): 46-49. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 叶展荣.全空间瞬变电磁法在隧道超前预报预测中的意义[J].[工程勘察](#),2018,46(3):75-78. [YE Zhanrong. Significance of full space transient electromagnetic method in the prediction of tunnel advanced prediction[J]. [Geotechnical Investigation & Surveying](#), 2018, 46(3): 75-78. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 邢修举,蒋齐平.瞬变电磁法在隧道溃口治理检测中的应用研究[J].[铁道勘察](#),2018,44(6):67-71. [XING Xiuju, JIANG Qiping. Application of transient electromagnetic method in tunnel collapse control detection[J]. [Railway Investigation and Surveying](#), 2018, 44(6): 67-71. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王红英,崔蓬勃.瞬变电磁法在隧洞富水性超前探测中的应用[J].[山西建筑](#),2018,44(4):149-151. [WANG Hongying, CUI Pengbo. Application of transient electromagnetic method in the tunnel advanced watery detection[J]. [Shanxi Architecture](#), 2018, 44(4): 149-151. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 舒森,王树栋,李广,等.瞬变电磁法指导复杂地质隧道超前水平钻探应用[J].[物探与化探](#),2018,42(6):1311-1316. [SHU Sen, WANG Shudong, LI Guang, et al. The application of TEM to guiding advance exploration drilling of complex geological tunnel[J]. [Geophysical and Geochemical Exploration](#), 2018, 42(6): 1311-1316. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 邢修举.岩溶隧道瞬变电磁三维超前探测技术研究[J].[隧道建设\(中英文\)](#),2019,39(2):287-293. [XING Xiuju. 3D transient electromagnetic advanced detection technology for karst tunnel[J]. [Tunnel Construction](#), 2019, 39(2): 287-293. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 刘锦东.瞬变电磁法在隧道裂隙水超前探测中的应用研究[J].[路基工程](#),2019(2):99-104. [LIU Jindong. Application of transient electromagnetic method in advanced detection of tunnel fissure water[J]. [Subgrade Engineering](#), 2019(2): 99-104. (in Chinese with English abstract)]

编辑:汪美华