

doi: 10. 11720/wtyht. 2020. 1606

胡佳豪, 李貅, 刘航, 等. TBM 机施工隧道瞬变电磁超前探测研究[J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 1183-1189. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2020. 1606](http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1606)

Hu J H, Li X, Liu H, et al. Research on the advanced detection of transient electromagnetic in tunnel construction by TBM[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1183-1189. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2020. 1606](http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1606)

TBM 机施工隧道瞬变电磁超前探测研究

胡佳豪¹, 李貅¹, 刘航², 胡伟明¹, 岳鑫¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710061; 2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 在隧道掘进机(TBM)施工隧道内,传统瞬变电磁的装置形式受到了TBM机械的限制,TBM自身的金属构件对二次场衰减电压的采集产生了强烈的电磁干扰。为了克服瞬变电磁法在TBM施工隧道内遇到的困难,在前人工作的基础上,尝试提出了一种基于电性源激发、电场分量采集的施工隧道瞬变电磁超前探测装置形式。针对钻爆法与TBM施工隧道各自不同的工况,利用三维时域有限差分法对单个电性源激励下隧道前方瞬变电磁场的分布规律与响应特征进行了正演模拟。通过对瞬变电磁场的分布规律以及响应特征进行分析,认为所述的电性源发射装置不仅可以在钻爆法施工隧道内使用,并且具有在TBM施工隧道内进行隧道超前预报的能力。

关键词: 隧道超前预报;TBM;瞬变电磁法;电性源;电场分量采集

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)05-1183-07

0 引言

随着我国隧道工程建设规模的不断扩大,隧道工程的数量和长度逐渐增加,部分隧道地质条件异常复杂,施工难度大大增加,这对隧道超前预报工作提出了更高的要求^[1-3]。目前钻爆法施工隧道地质超前预报技术发展较快,主要包括:超前钻探类(超前导坑、探洞、超前钻探等),地震反射类(隧道负视速度法、隧道地震预报TSP、隧道反射成像TR)、极小偏移距地震波法等),电磁类(地质雷达、隧道瞬变电磁等),直流电法类(激发极化法、电阻率法等)以及其他方法(核磁共振法、红外探水法、温度探测法等)。由于每类探测方法是以地质介质的某一性质(弹性性质、导电性质、导热性质等)差异为物理基础,每类技术都有各自的适用范围、敏感特性和优缺点。李术才等提出了四阶段全过程的隧道综合地质超前预报体系,充分利用每种方法的优势,初步形成了基于约束联合反演理论的预报方法^[3]。

但是隧道掘进机(TBM)施工条件下的隧道超前预报技术的进展却比较缓慢,这主要是因为隧道掘进机施工方法自身的特殊性和复杂性。造成这一现象的主要原因为:①掘进机(TBM)这一大型机械占据了隧道掌子面后方大部分的施工空间,使得无法在隧道掌子面的边墙上布设超前探测的测线以及激发装置和接收传感器,并且超前地质预报的观测空间非常狭小,很难建立一种对隧道掌子面前方不良地质体地球物理响应敏感的观测模式,比如在钻爆法中可用的TSP、TRT、TST等技术很难在TBM机施工隧道中应用。②隧道掘进机施工(TBM)条件下的物理环境极为复杂,会引发巨大的干扰和假异常响应,我们无法观测到掌子面前方的有效地球物理响应,这导致在钻爆法施工隧道中可用的瞬变电磁技术和地质雷达技术均无法适用于TBM施工下的隧道超前预报环境^[4-7]。为此,本文提出了将电性源作为激发源代替传统的回线源进行隧道超前预报工作。相比于回线源,电性源电极直接布设在隧道掌子面上,供以发射电流,在一次场断开之后观测

收稿日期: 2019-12-27; 修回日期: 2020-05-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502600); 国家自然科学基金重点项目(41830101)

作者简介: 胡佳豪(1996-),男,就读于长安大学地质工程与测绘学院地球物理系,硕士研究生,研究方向:瞬变电磁法。Email: hujiahao_pa@163.com

二次场。电性源直接向地层中直接辐射电流,其二次场电场的能量主要以涡旋电流为主,并且电场在电性分界面法向分量连续^[8-9],并且 TBM 机所感应出的二次电场的水平分量场值较小,在一定程度上能够降低 TBM 机对于电性源瞬变电磁的二次电场影响。

本文主要研究了以单个电性源作为发射源的瞬变电磁法在隧道超前预报中的响应特点。研究思路如下:基于瞬变电磁时域有限差分(FDTD)程序,研究了以单个电性源作发射源在钻爆法施工条件下以及 TBM 机施工条件下的瞬变电磁响应,探索电磁场的三个分量关断后在隧道掌子面附近的分布情况,以及 TBM 机退刀距离对瞬变电磁响应的影响规律。最后计算了含不同异常含水体的模型,并分析了其异常响应规律,验证了电性源装置在 TBM 机施工条件下进行超前预报的可行性。

1 电性源瞬变电磁有限差分原理

论文的这一部分主要介绍了采用时域有限差分法(FDTD)进行隧道模型下电性源瞬变电磁仿真的原理。隧道模型区别于其他的模型,需要对时域有限差分法做一些适当的改进。在这一部分,本文主要参照了孙怀凤和卢绪山的做法^[10-11],介绍了隧道模型下激励源的施加方法、非均匀网格的剖分方案、边界条件、空气层电导率的处理方式。

在瞬变电磁勘探领域常常会忽略位移电流,在忽略位移电流后麦克斯韦方程组为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E}, \\ \nabla \times \mathbf{E} = 0, \\ \nabla \times \mathbf{H} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

为了进行时间域上的迭代,在方程(1)中加入了人工虚拟位移电流项,之后方程(1)变为:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}, \quad (2)$$

在有源的区域,还需要加上电流密度项:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_s. \quad (3)$$

式中: \mathbf{J}_s 是源电流密度。

在时间域有限差分法(FDTD)离散中,电场和磁场空间离散方式如图 1 所示。在 Yee 元胞中每一个磁场分量被 4 个电场分量环绕,其中的一个电场分量被 4 个磁场分量环绕;给定相应初值,由有限时

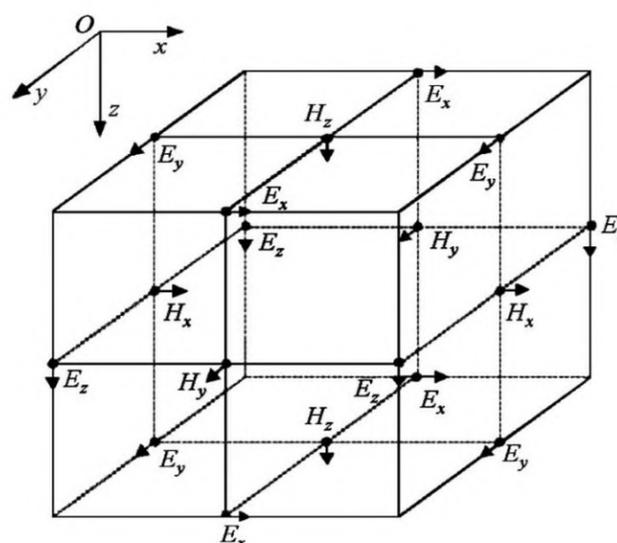


图 1 FDTD 计算采用的 Yee 晶胞格式

Fig. 1 Yee cell format used in FDTD calculation

域差分法(FDTD)方法就可以逐步推进,求得以后各个不同时刻空间电磁场的分布^[12-13]。

当进行大尺寸模型的正演计算或特殊模型下小网格正演计算时,由于均匀网格剖分会产生非常大的网格数量,这将导致计算量变大,所需的计算内存过大。为了降低计算内存,减少计算时间,有必要采取非均匀网格的剖分方案。非均匀网格是指在沿坐标轴的某一方向上网格的尺寸是变化的,一般情况下按照一定的系数进行等比例放大。在非均匀网格剖分中,为了保证计算精度,在模型中有源区域以及有异常体分布的区域采用均匀剖分,而对于远离源或者异常体的模型边界处,采用非均匀剖分。

2 装置布设形式和三维模型剖分

设定正演模型如图 2 所示。隧道模型正演计算采用规模为 221×221×330 的网格来进行异常体的剖分,采用非均匀网格剖分方案,在掌子面附近电磁场变化剧烈的部分和异常体部分采用 0.2 m 的网格进行均匀剖分,远离掌子面的部分其网格大小按一定的比例系数增大。

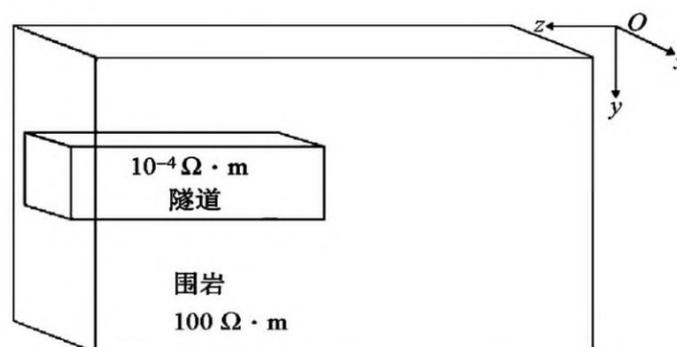


图 2 隧道模型示意

Fig. 2 Schematic diagram of tunnel model

本次正演模拟等效洞径 8 m 的隧道,根据面积相近的原则,在实际正演计算中设计的隧道模型为一个截面为 7 m^2 长方体。发射源位于隧道掌子面的中心,两个电极分别位于掌子面两侧,电极距 7 m, 布置方式如图 3 所示。发射源采用脉宽为 1 ms 的矩形脉冲,发射电流 5 A。在利用瞬变电磁法进行隧道超前预报探测工作时,隧道腔体被认为是在均匀全空间内存在的高阻异常体。围岩电阻率 $100\ \Omega \cdot \text{m}$,隧道空腔电阻率设为 $10^4\ \Omega \cdot \text{m}$ 。本次正演计算均采用统一的对于双护盾 TBM 机模型进行剖分,建立的计算模型如图 4 所示。

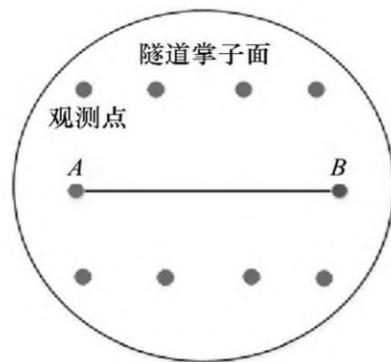


图 3 隧道掌子面发射源与接收点布设示意

Fig. 3 Layout of transmitting source and receiving point of tunnel face

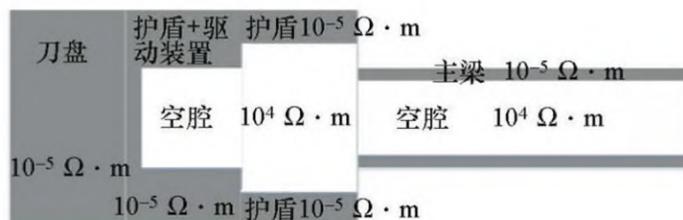


图 4 TBM 机计算模型

Fig. 4 Calculation model of TBM

正演模拟中,围岩与隧道空腔的电导率以及激励源的施加方式与钻爆法施工下的计算模型相一致,其差别在于在原本的钻爆法隧道施工模型中加入了 TBM 机。TBM 机距隧道掌子面的距离为 1 m。设计的计算模型如图 5 所示。

3 TBM 机施工隧道电性源瞬变电磁响应特征

在 TBM 机施工条件下的隧道超前预报领域中,TBM 机可被视为一个巨大的良导体,其所产生的强电磁干扰环境直接影响了瞬变电磁法的探测能力,导致瞬变电磁法不适应于 TBM 机施工条件下隧道超前预报工作。本文正是基于这一点针对与 TBM

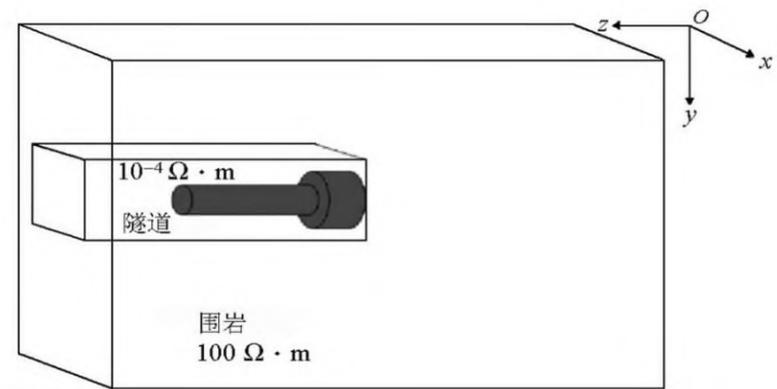


图 5 含 TBM 机的模型示意

Fig. 5 Schematic diagram of calculation model with TBM

机施工环境下的隧道超前预报工作提出了一些尝试性的探索。首先对常见的双护盾型 TBM 机进行精细化剖分,并加置于上节所述的纯隧道空腔模型中,以此来模拟 TBM 机施工下的隧道环境。从二次场的空间分布图和隧道掌子面上接收到的电磁场信号入手,分析 TBM 机对于电磁场的影响程度。对于在隧道掌子面上的瞬变电磁响应,本节尝试性的对接收点位置的选取问题进行了一些探索。最后针对不同的 TBM 机退刀距离对于瞬变电磁场的影响程度问题,本节也做了一些讨论。

为了研究单个电性源激励下电场的三个分量关断后的散射场在空间中的分布,绘制了关断后 $10\ \mu\text{s}$ 时刻电场在 xOz 平面上的等值线分布(图 6,图 7)。从图中可以看出,TBM 机并未对隧道掌子面前方扩散的二次电场产生较大影响。

TBM 机的存在会给磁场分量带来巨大的干扰,造成低阻假异常现象,直接影响了瞬变电磁法的探测能力。由图 8 可以看出 TBM 机对于电场水平分量的影响较小。对于电场的 E_x 分量,TBM 机的存在并未产生较大的影响,这两种情况下的电场衰减曲线几乎重合。对于 E_y 分量,TBM 机的存在使衰减曲线出现了 2 次微弱的变号现象,在晚期衰减曲线趋于重合。对于 E_z 分量,TBM 机的存在使该电场的强度增大,出现了变号现象,但晚期与纯隧道空腔模型下的衰减曲线趋于重合。另外,在电性源作为激发源时,对比电场三分量的场的幅值大小可以得出结论:在该种电性源装置下,电场由 E_x 分量主导,并且 TBM 机对于 E_x 分量的影响最小,故主要研究 E_x 分量的瞬变电磁响应特征。

在隧道建设工程中,TBM 机不仅有切割岩石向前掘进的作用,其对隧洞内部的软弱岩体还具有支护的作用。鉴于此,TBM 机实际的退刀距离应该越小越好。但同时 TBM 机距隧道的掌子面越近,其对瞬变电磁法的干扰就越大。综合考虑以上两点工程

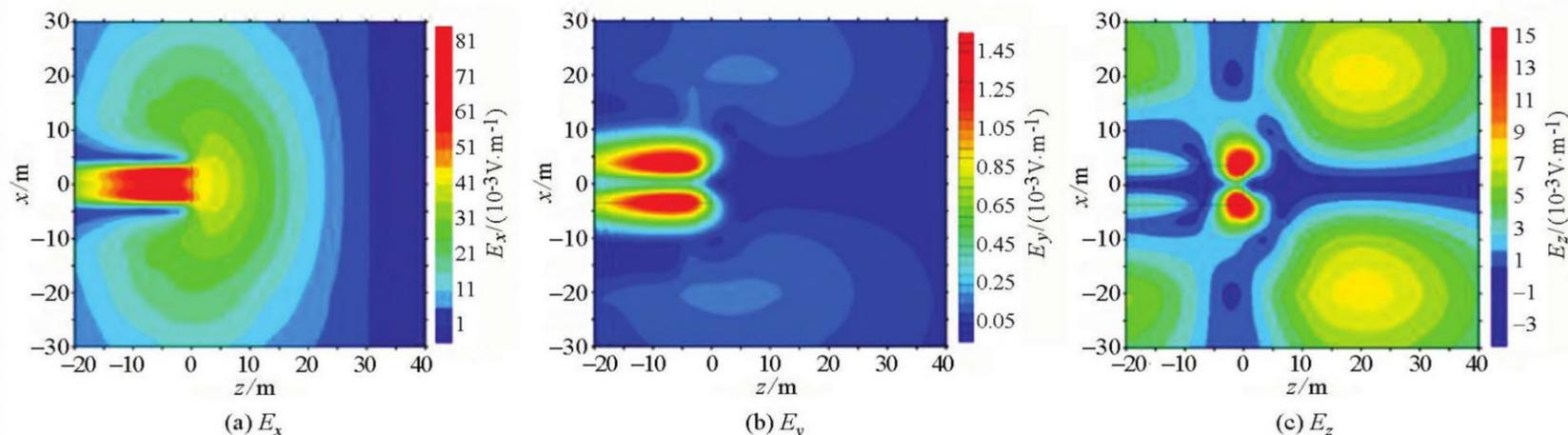


图 6 关断后 10 μs 隧道模型掌子面前方电场分布

Fig. 6 Electric field distribution in front of 10 μs tunnel model after closure

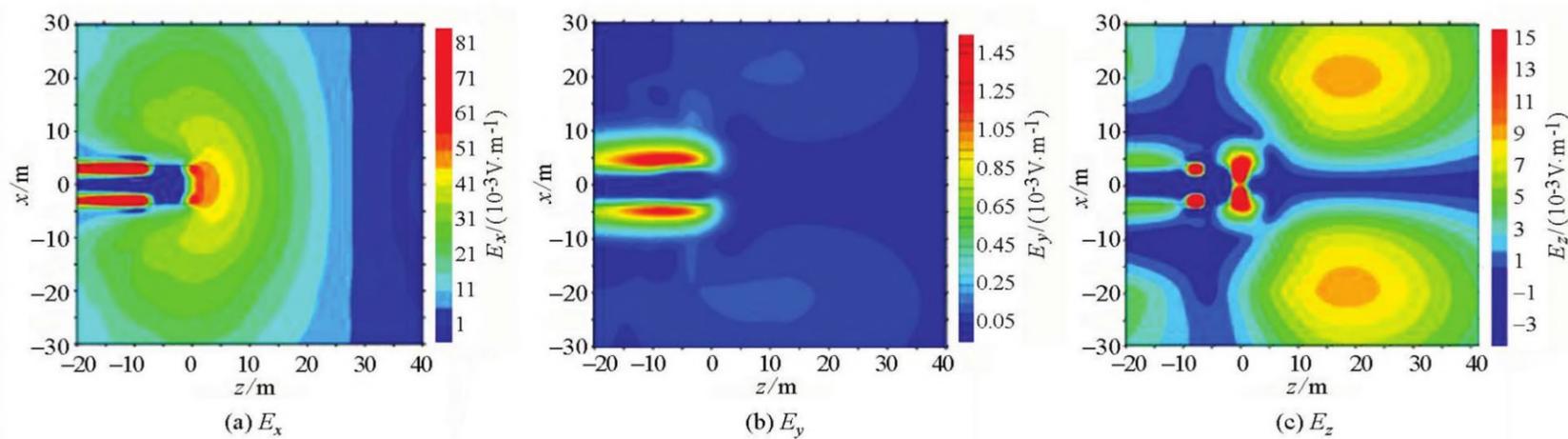


图 7 关断后 10 μs TBM 机模型掌子面前方电场分布

Fig. 7 Electric field distribution in front of 10 μs TBM model hand after shut down

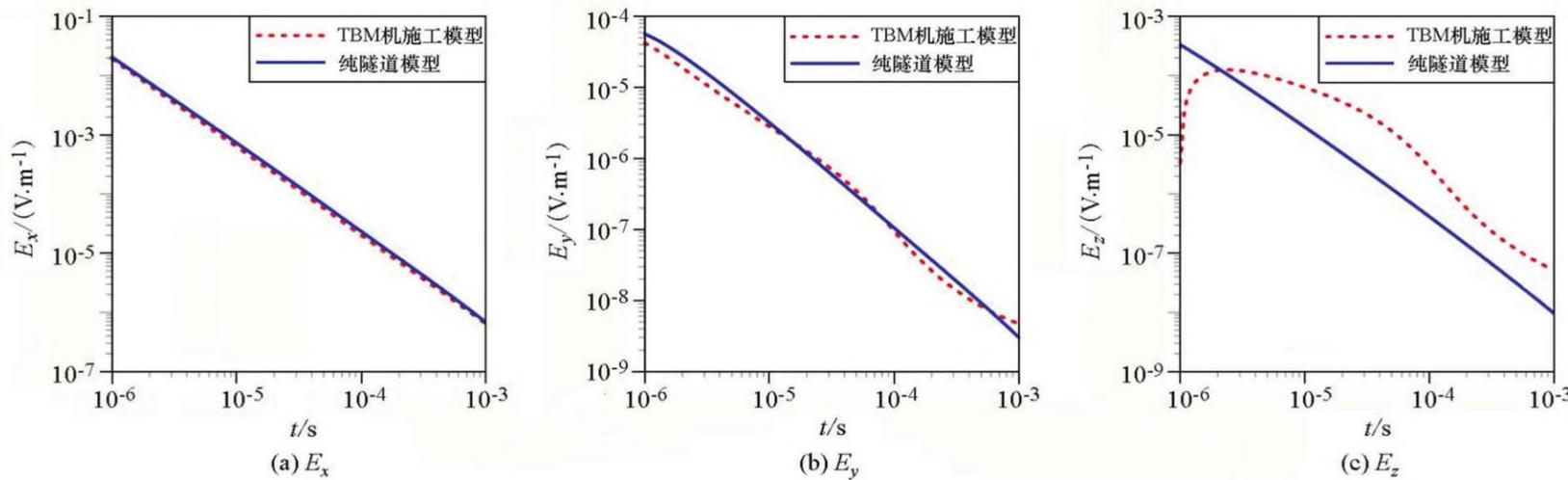


图 8 隧道掌子面上观测点的电场 E_x 、 E_y 、 E_z 分量衰减曲线对比(观测点见图 3 所示)

Fig. 8 Comparison of attenuation curves of electric field E_x 、 E_y and E_z components of observation points on tunnel face

需求,为了研究不同退刀距离下 TBM 机对于二次电场的影响情况,并结合上文的分析结果,设计了退刀距离分别为 0.2、0.5、1 m 的计算模型。为了解关断后电场在模型内部的分布情况,选取关断后 10 μs 时刻绘制了电场中的 3 个分量在 xOz 平面上的等值线分布及衰减曲线(图 9,图 10)。可以看到,在 TBM 机不同退刀距离下,二次场的电场 E_x 分量并未受到 TBM 机的干扰。

4 三维地质模型正演模拟

本节主要探索在 TBM 机施工条件下,本文所述探测方式下的隧道掌子面前方导水断层的瞬变电磁响应。在本次正演计算中充水断层的轴向与隧道的轴向一致,围岩电阻率为 $100 \Omega \cdot m$,隧道空腔的电阻率为 $10^4 \Omega \cdot m$,充水断层的规模为 $50 m \times$

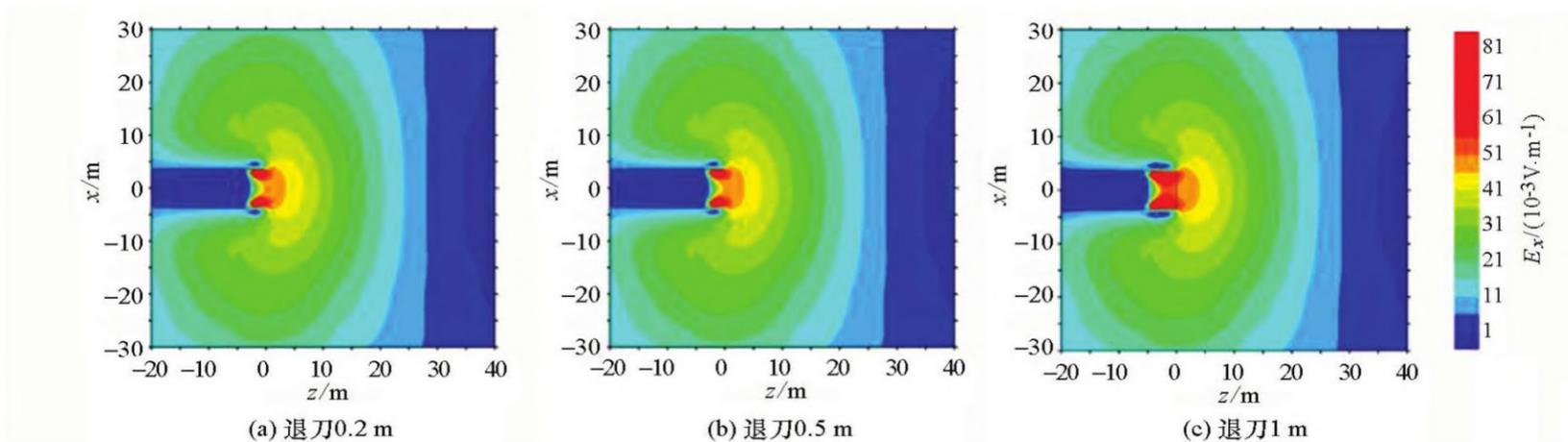


图 9 TBM 机不同退刀距离下关断后 10 μs 后 E_x 分量在 xOz 平面上的分布

Fig. 9 10 μs after closing of TBM under different backoff distance distribution of electric field E_x component in xOz plane

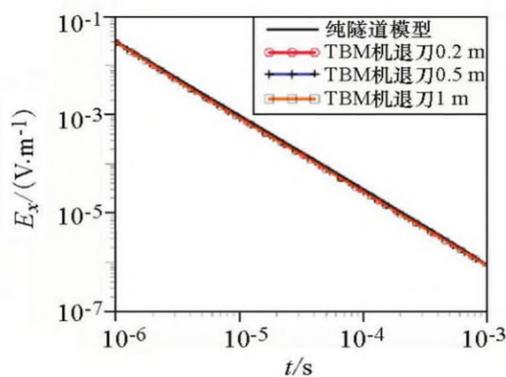


图 10 TBM 机不同退刀距离下的 E_x 分量的衰减曲线(观测点见图 3 所示)

Fig. 10 TBM machine with different tool withdrawal decay curve of electric field E_x component

10 m×1 m,电阻率为 $1 \Omega \cdot m$ 。计算模型如图 11 所示。本次正演模拟设定的双护盾 TBM 机距隧道掌子面的距离为 0.2 m,充水断层分别位于隧道掌子面前方 15、20、25 m 处。

在图 12 中可以看到,在 TBM 机施工环境下电场的水平分量对隧道前方的含水异常体有较强的探测能力,可以看到随着含水异常体距离隧道掌子面越来越远,异常响应越来越微弱,异常响应的凹点出现的时间越来越晚。根据这些异常响应特征,可以对异常的规模和异常体与隧道掌子面的距离进行定量估计。

针对异常体距隧道掌子面 15 m 的正演模型,利用基于牛顿迭代法的全域视电阻率定义方法对电场 E_x 分量做了视电阻率的定义^[14-15],其隧道掌子面原始电场 E_x 分量衰减信号和视电阻率曲线如图 13 所示。从图 13b 中可以直观地看出隧道掌子面前方存在一低阻异常体。

5 结论

本文针对隧道施工期突水突泥灾害超前精细化

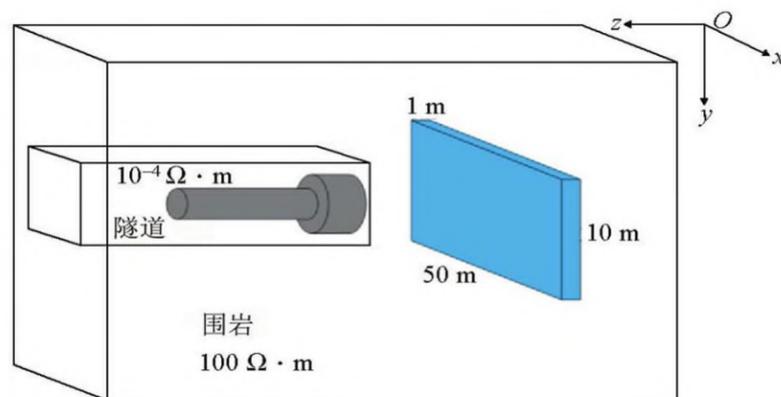


图 11 计算模型示意

Fig. 11 Schematic diagram of calculation model

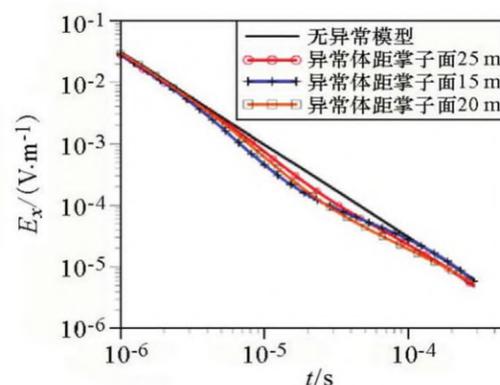


图 12 TBM 施工隧道含水断层距离隧道掌子面不同距离下 E_x 异常响应曲线(观测点见图 3 所示)

Fig. 12 Distance between water bearing fault of TBM construction tunnel and tunnel face abnormal response curve of horizontal component of electric field at different distances

探测这一问题,尝试提出了一种基于电性源发射、电场分量采集的洞内瞬变电磁超前预报的新装置形式与观测模式。具体设计思路为:电性源通过供电电极与供电导线布置在掌子面上,之后,采用电场的水平分量作为观测分量。为验证本文所提出的装置形式与观测模式,采用了三维时域差分数值模拟方法,对钻爆法和 TBM 两类隧道环境内电性源激发的瞬变电磁场的分布规律与响应特征进行了正演模拟。

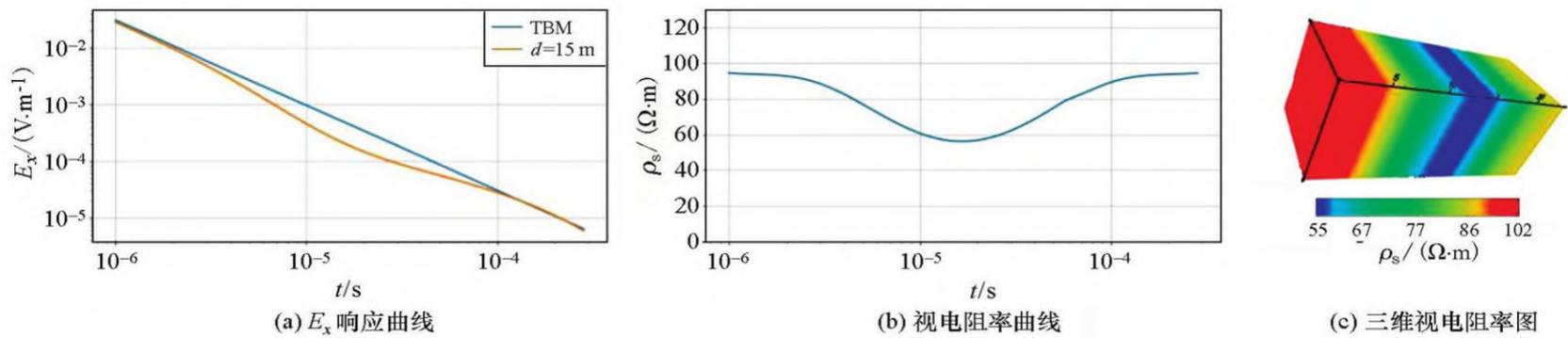


图 13 含水异常体距隧道掌子面 15 m 模型下的电场水平分量衰减曲线及视电阻率曲线
 Fig. 13 The water bearing abnormal body is 15 m away from the tunnel face attenuation curve and apparent resistivity of horizontal component of electric field

通过对二次场的空间分布及其响应特征进行对比分析,得出的主要结论如下:

1) 在采用电性源进行激发的条件下,瞬变电磁场的电场 E_x 分量的幅值最大,占主导地位。

2) TBM 机作为一个巨大的良导体在隧道施工中会对瞬变电磁超前探测中的磁场信号带来较大干扰,但是相对于电性源,TBM 机对于 E_x 分量的影响非常小, E_x 分量对隧道掌子面前方的异常体仍存在明显的异常响应。据此可以进行对 TBM 机施工条件下隧道超前预报瞬变电磁响应视电阻率的定义。

3) 本文提出的基于电性源激发、电场分量采集的装置形式与观测模式,能够满足近距离范围内隧道超前预报的要求。通过在掌子面上布设电极观测二次场电位差的观测方式,能够在很大程度上屏蔽 TBM 对响应信号的干扰作用。通过电极采集的二次场电位信号受 TBM 影响小,不需经过 TBM 干扰剔除。

参考文献 (References):

[1] 洪开荣. 我国隧道及地下工程发展现状与展望[J]. 隧道建设, 2015, 35(2): 95 - 107.
 Hong K R. Current situation and prospect of tunnel and underground engineering development in China [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(2): 95 - 107.

[2] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945 - 1956.
 Qian Q H. Challenges and countermeasures for safety of underground engineering construction [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945 - 1956.

[3] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090 - 1113. Li S C, Liu B, Sun H F, et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1090 - 1113.

[4] 赵永贵, 刘浩, 孙宇, 等. 隧道地质超前预报研究进展[J]. 地

球物理学进展, 2003, 18(3): 460 - 464.
 Zhao Y G, Liu H, Sun Y, et al. Advance in advance prediction of tunnel geology [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(3): 460 - 464.

[5] 孙怀凤. 隧道含水构造三维瞬变电磁场响应特征及突水灾害源预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 648.
 Sun H F. Three dimensional transient electromagnetic field response characteristics of tunnel water bearing structure and prediction of water inrush disaster source [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 648.

[6] 薛国强, 李貅. 瞬变电磁隧道超前预报成像技术[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 894 - 900.
 Xue G Q, Li X. Advanced prediction imaging technology of TEM tunnel [J]. Journal of Geophysics, 2008, 51(3): 894 - 900.

[7] 孙怀凤. 隧道瞬变电磁三维探测[C]//中国地球物理学会第二十七届年会论文集. 中国地球物理学会, 2011.
 Sun H F. Three dimensional detection of transient electromagnetic in tunnel [C]//Proceedings of the 27th Annual Meeting of China Geophysical Society. China Geophysical Society, 2011.

[8] 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 TEM sounding [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2002.

[9] 陈卫营, 薛国强, 崔江伟. 电性源瞬变电磁发射源形变对观测结果影响分析[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 126 - 132.
 Chen W Y, Xue G Q, Cui J W. Analysis of the influence of the deformation of the transient electromagnetic emission source of the electric source on the observation results [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 126 - 132.

[10] 卢绪山. 隧道 TBM 机瞬变电磁响应三维并行模拟及干扰去除研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
 Lu X S. Three dimensional parallel simulation of transient electromagnetic response of tunnel TBM and study of interference removal [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.

[11] 孙怀凤. 隧道含水构造三维瞬变电磁场响应特征及突水灾害源预报研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
 Sun H F. Three dimensional transient electromagnetic response characteristics of tunnel water bearing structure and prediction of water inrush disaster source [D]. Jinan: Shandong University, 2013.

- [12] 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分方法(第三版)[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2011.
Ge D B, Yan Y B. Finite difference time domain method of electromagnetic wave (Third edition)[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2011.
- [13] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations[J]. IEEE Trans. Antennas Propag, 1966, 14(3): 302-307.
- [14] 戚志鹏,智庆全,李貅,等. 隧道瞬变电磁任意点垂直分量全域视电阻率解释方法[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(7): 1426-1434.
- Qi Z P, Zhi Q Q, Li X, et al. Interpretation method of global apparent resistivity of vertical component at any point of tunnel transient electromagnetic field [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1426-1434.
- [15] 张莹莹,李貅,姚伟华,等. 多辐射场源地空瞬变电磁法多分量全域视电阻率定义[J]. 地球物理学报,2015,58(8):2745-2758.
- Zhang Y Y, Li X, Yao W H, et al. Definition of multicomponent global apparent resistivity of multi radiation field source ground air transient electromagnetic method [J]. Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2745-2758.

Research on the advanced detection of transient electromagnetic in tunnel construction by TBM

HU Jia-Hao¹, LI Xiu¹, LIU Hang², HU Wei-Ming¹, YUE Xin¹

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Xi'an Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: When the tunnel passes through the complex strata with bad geological development, it often encounters geological disasters such as water inrush, mud inrush, collapse and roof fall. During the construction of the tunnel, the advanced geological prediction for the adverse geological disasters such as water and mud inrush has become an important issue to ensure the construction safety. Transient electromagnetic method has been widely used in the prediction of tunnel and underground cavern construction period. However, with the increasingly complex construction environment, the application of traditional TEM is restricted by various factors. For example, in TBM construction tunnel, the traditional transient electromagnetic device form is limited by TBM machinery, and the metal components of TBM produce strong electromagnetic interference to the collection of secondary field attenuation voltage, which makes this kind of method difficult to apply to TBM construction tunnel at present. In order to overcome the difficulties encountered by TEM in TBM tunnel construction, the authors, based on previous work, attempted to put forward a type of TEM advanced detection device based on electrical source excitation and electric field component acquisition. According to the different working conditions of drilling and blasting method and TBM construction tunnel, the three-dimensional finite-difference time-domain method is used to simulate the distribution and response characteristics of transient electromagnetic field in front of the tunnel excited by a single electrical source. Based on the analysis of the distribution and response characteristics of transient electromagnetic field, the authors hold that the single electrical source launching device not only can be used in the tunnel construction by drilling and blasting but also has the capability of advanced prediction in the tunnel construction by TBM.

Key words: tunnel advance prediction; TBM; transient electromagnetic method; electrical source; electric field component acquisition

(本文编辑:沈效群)