

中文引用格式:梁庆华,刘恩杰,陈素贞,等. 地铁隧道软硬不均地层瞬变电磁场数值模拟及响应特征[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(12):36-43.

英文引用格式: LIANG Qinghua, LIU Enjie, CHEN Suzhen, et al. Numerical simulation and response characteristics of transient electromagnetic fields in heterogeneous strata of subway tunnels[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(12):36-43.

地铁隧道软硬不均地层瞬变电磁场 数值模拟及响应特征*

梁庆华¹教授, 刘恩杰¹, 陈素贞²高级工程师,
王伟娜³讲师, 王春源¹高级实验师

(1 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520; 2 山东鲁泰控股集团有限公司
鹿洼煤矿, 山东 济宁 272350; 3 重庆建筑科技职业学院, 重庆 401331)

中图分类号: X935

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.12.0317

基金项目: 国家自然科学基金资助(52474238)。

【摘要】 为应对城市地铁盾构在软硬不均地层中施工面临的安全风险与地质灾害, 研究地面瞬变电磁法在该类地层中进行超前探测的适用性与识别特征。以青岛某地铁区间为例, 针对城市地铁埋深较浅(一般 30~50 m)的特点, 利用 COMSOL 有限元软件建立上软下硬的数值模型, 通过模拟瞬变电磁响应过程, 获取不同测点的电场响应结果及异常响应特征, 并结合现场实测数据, 对比验证数值模拟结果, 总结地层软硬不均异常的判断依据。结果表明: 地层软硬不均会引发电场响应显著变化, 位于异常体正上方的测点响应曲线变化最为剧烈, 衰减速率最大, 地面瞬变电磁法可用于识别地层软硬不均的异常; 电场衰减速度受介质性质及与异常区距离的共同影响, 表现为近异常区衰减快、远异常区衰减慢的“凹槽现象”; 视电阻率等值线图中隧道穿越处小范围内等值线波动幅度剧烈, 软岩呈低阻异常, 硬岩呈高阻异常, 电阻率多呈现低阻至高阻或高阻至低阻的转换特征。

【关键词】 地铁隧道; 软硬不均地层; 瞬变电磁; 数值模拟; 超前探测

Numerical simulation and response characteristics of transient electromagnetic fields in heterogeneous strata of subway tunnels

LIANG Qinghua¹, LIU Enjie¹, CHEN Suzhen², WANG Weina³, WANG Chunyuan¹

(1 School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong 266520, China; 2 Luwa Coal Mine, Shandong Lutai Holding Group Co., Ltd., Jining Shandong 272350, China; 3 Chongqing College of Architecture and Technology, Chongqing 401331, China.)

Abstract: To address the safety risks and geological hazards encountered during urban subway shield tunneling in soft-hard uneven strata, the applicability and identification characteristics of the surface transient electromagnetic method for advanced detection in such formations were investigated. Taking a metro section in Qingdao as an example, and considering the generally shallow burial depth of urban subways (typically 30-50 m), a numerical model of upper-soft and lower-hard strata was established

using COMSOL finite element software. Through simulation of the transient electromagnetic response process, electric field response results and anomalous characteristics at different measurement points were obtained. Combined with field-measured data, the numerical simulation results were compared and validated, and the criteria for identifying soft-hard uneven anomalies in the strata were summarized. The results indicate that soft-hard uneven strata induce significant variations in the electric field response. The response curve at the measurement point directly above the anomalous body exhibits the most drastic changes and the fastest decay rate, demonstrating that the surface transient electromagnetic method can be utilized to identify anomalies in soft-hard uneven strata. The rate of electric field attenuation is jointly influenced by the properties of the medium and the distance from the anomalous zone, manifesting as a "trough phenomenon", with faster attenuation near the anomaly and slower attenuation farther away. In the apparent resistivity contour maps, the tunnel-crossing areas exhibit intense small-scale contour fluctuations, with soft rock showing low-resistivity anomalies and hard rock showing high-resistivity anomalies. Resistivity often transitions from low to high or from high to low, reflecting the heterogeneous characteristics of the strata.

Keywords: subway tunnel; soft and hard heterogeneous strata; transient electromagnetic; numerical simulation; advanced detection

0 引言

特殊而复杂的地质条件是盾构在软硬不均地层发生诸多问题的主要原因^[1]。由于硬岩层和软弱岩层的物理特性差异较大^[2],硬岩层通常具有较好的强度和硬度,软弱岩层通常质地松软且强度较低,盾构机的刀具会随着刀盘旋转,在软地层与硬地层之间循环切换,使受力环境产生不均匀分布^[3],不断变化的地层状况常常导致各类地铁隧道事故的发生,可能会导致地层变形和沉降,对地面建筑物和地下管线造成损害^[4],刀具的过度磨损或损坏可能导致盾构机无法正常工作,进而影响施工进度和安全^[5]。

瞬变电磁法在地下探测过程中有其独特的优势,其施工效率高且对低阻体敏感,是在高阻围岩中寻找低阻地质体较灵敏的方法,异常响应强,分辨能力强^[6]。梁庆华等^[7]采用瞬变电磁法技术分析了矿井探测异常;高晓耕^[8]采用新型纳米瞬变电磁法,划定了井筒区域流砂层塌陷空洞范围;张子强^[9]证明了瞬变电磁法在三维空间地下水的发育位置、分布范围及水量预测方面有明显优势;李辉等^[10]利用瞬变电磁法对某段高速公路隧道工作面进行超前地质预报,较准确地预测了地下水的发育段落;郑洪斌^[11]采用瞬变电磁法探测技术(Transient Electromagnetic Method, TEM),通过 COMSOL 有限元模拟软件建立几何模型,分析了隧道前方溶洞的电磁响应特征;王春源等^[12]验证了浅

埋深瞬变电磁法可有效识别工作面前方不同位置的低阻异常体;GUO Changang 等^[13]建立了多套全区域仿真模型,以研究瞬态电磁响应的规律和因素,得出电性能、距离和尺寸对规则异常地质体的瞬态电磁响应影响最大,而电磁场投影区域对不规则地质体也有影响,研究可推进 TEM 的数据处理和解释技术,并为详细研究提供理论依据;CHENG Jiulong 等^[14]提高了探测中低电阻率异常体与围岩之间地电界面的识别。现有研究多聚焦于瞬变电磁法在矿井或深埋隧道的应用,而针对城市地铁浅埋隧道的探测仍存在以下问题:浅层信号易受地表噪声干扰,异常响应特征缺乏系统分析。

鉴于此,笔者拟基于地面瞬变电磁城市地铁隧道超前预报,通过软件建立上软下硬的模型,探究瞬变电磁法在地面高干扰环境下探测软硬不均地层的适应性,并研究传播特性和异常响应特征,提出基于视电阻率等值线波动幅度的地层软硬不均的判断依据,以期为城市地下工程超前探测提供一定参考。

1 瞬变电磁法基本原理

瞬变电磁法属于时间域电磁探测技术。其原理是在一次电流脉冲场的激励下,地下介质会感应产生涡流,该涡流在脉冲间歇期间不会即刻消散,从而在周围空间形成随时间衰减的二次磁场^[15]。二次磁场随时间衰减的规律主要取决于异常体的导电性、体积规模和埋深,以及发射电流的形态和频

率^[16]。通过分析接收线圈所测二次场的空间分布特征,即可实现对地下异常体的探测。瞬变电磁视电阻率 ρ_τ 计算公式为^[17]:

$$\rho_\tau = 6.32 \times 10^{-12} \times (S \times N)^{2/3} \times (s \times n)^{2/3} \times (V/I)^{-2/3} \times t^{-5/3} \quad (1)$$

式中: S 为发射回线面积, m^2 ; n 为发射回线匝数; V 为感应电压, V ; I 为供电电流强度, A ; s 为接收回线面积, m^2 ; n 为接收回线匝数; t 为二次场衰减时间, s 。

2 探测区间地质概况

以青岛地铁某区间为例,该工程线路场区跨越的地貌单元为构造剥蚀地貌、山麓斜坡堆积地貌、河流侵蚀堆积地貌^[18]。这种地质条件在沿海丘陵城市中非常典型,其“上软下硬”复合地层是盾构施工的难题,若能较准确地探测并总结软硬不均地层的关键异常特征,形成可复用的判据,就能为类似地质条件的城市地铁隧道工程提供范本。青岛地铁隧道埋深较浅(30~50 m),正好处于地面小线圈瞬变电磁法有效探测深度范围内。埋深太深会导致信号衰减严重,太浅则受地表干扰太大。本次超前探测主要涉及地层从上至下为:①素填土;②全风化安山岩(正常风化);③强风化安山岩(正常风化);④微风化安山岩(正常风化)。岩体结构类型多为散体状结构,图1为青岛市地铁某区间地质情况。由图1可知:本次超前探测软弱地层为强风化安山岩,为极软岩,岩体呈散体状结构,完整程度为极破碎,岩体基本质量等级V级。硬地层为微风化安山岩,属较坚硬岩,岩体完整程度为破碎,岩体基本质量等级为IV级。由于高风化地层中的岩石多破碎为角砾和碎块,且风化裂隙极为发育,因此,易形成良好的储水空间。这些富水区通常以似层状分布于地势相对低洼的地带。

3 不均地层瞬变电磁数值模拟

开展地面瞬变电磁数值模拟,采用 COMSOL 软件进行瞬变电磁正演,通过分析二次场的响应特征推断软硬不均地层的电性、位置及深度^[15],模拟过程分为前处理、求解和后处理3大部分,可有效、直观地研究地电场分布特征。

3.1 模型建立

在地面瞬变电磁法模拟中,采用重叠回线装置探测。在探测过程中沿隧道轮廓线方向以10 m的

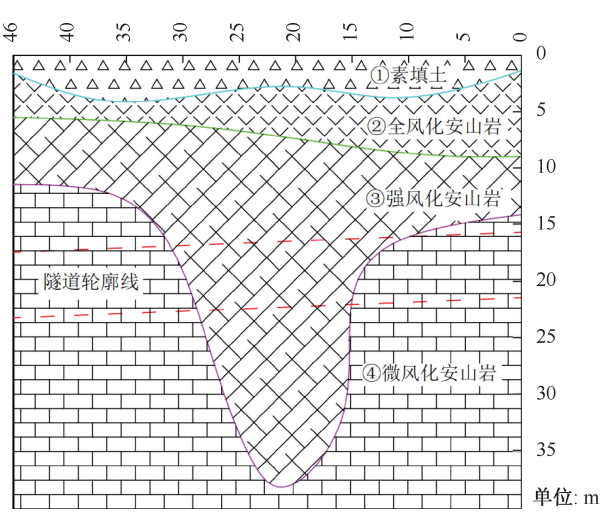


图1 区段地质情况

Fig. 1 Geological conditions of the section

间隔铺设线圈并尽量保持线圈与地表平行。为切合青岛地铁某区间工程地质背景,根据区段地质实际情况,考虑到浅地表岩层起伏变化不大,对其下方岩层影响较小,所以在建模时合并为一个岩层(软),使其与下方岩层(硬)作为对比。从上至下将模型分别设置为空气层、岩层(软)与岩层(硬),如图2所示。其中,空气层(长50 m,宽20 m,高10 m)、岩体层(长50 m,宽20 m,高40 m)、发射线圈(半径0.02 m)、接收线圈(半径0.02 m),测点1坐标为($X=0, Y=20, Z=10$),测点2坐标为($X=0, Y=10, Z=10$),测点3坐标为($X=0, Y=0, Z=10$),测点4坐标为($X=0, Y=-10, Z=10$),测点5坐标为($X=0, Y=-20, Z=10$),几何模型如图3所示。

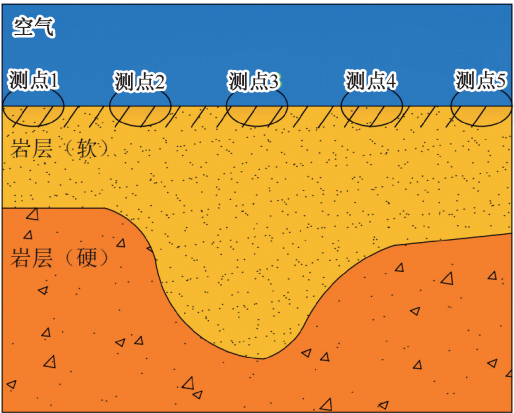


图2 地面瞬变电磁法理论分析模型

Fig. 2 Theoretical analysis model of the ground transient electromagnetic method

根据前期隧道地勘报告并为模拟软硬不同地层情况,设置地层模型电磁属性,见表1。

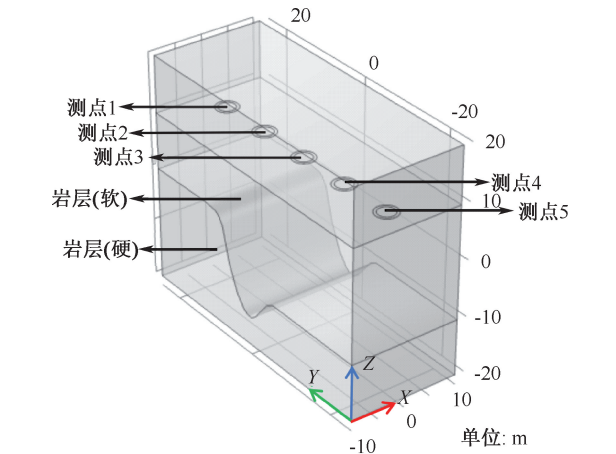


图 3 几何模型
Fig. 3 Geometric model

表 1 几何元素属性

几何	空气	岩体(软)	岩体(硬)	线圈
电导率/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	1×10^{-6}	1×10^{-2}	1×10^{-4}	6×10^7
相对磁导率	1	1	1	1
相对介电常数	1	10	6	1

发射线圈电流 $I = 10 \times \text{rect}_1(t[1/\text{s}])$, 函数 $\text{rect}_1(t)$ 如图 4 所示, 完全关断时间为 0.500 10 s。

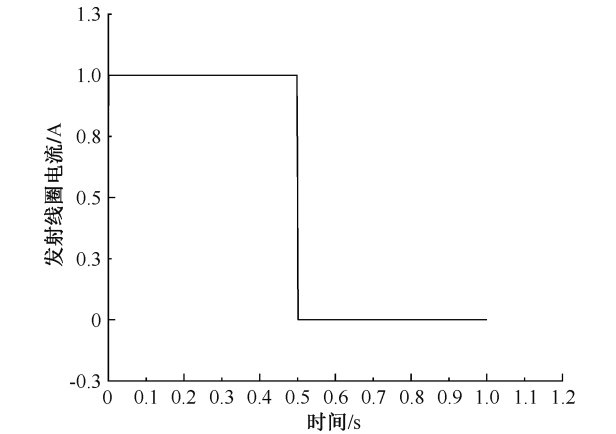


图 4 瞬变电磁函数 $\text{rect}_1(t)$ 图像

Fig. 4 Transient electromagnetic function $\text{rect}_1(t)$ graph

3.2 响应特征

采用 COMSOL 软件数值模拟瞬变电磁软硬地层, 模拟计算电磁影响曲线如图 5 所示。

电流信号在 0.500 01 s 时断开。在 0.500 01 ~ 0.500 04 s 的时间段内电场响应变化不明显。在变化的过程中电场衰减幅度最大的时间段是 0.500 04 ~ 0.500 08 s, 推断衰减幅度剧烈阶段是由于接收线圈受位于其下方的软硬不均地层的电信息影响。

通过不同测点的电场响应强度对数曲线发现,

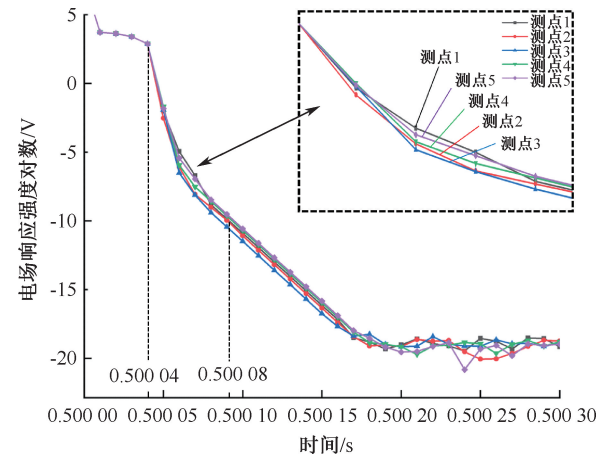


图 5 测点 1~5 时瞬变电磁响应强度对数对比
Fig. 5 Comparison of the logarithm of transient electromagnetic response intensities at measurement points 1 to 5

不同测点对于软硬地层的响应曲线变化特征大致相同, 对地层软硬不均的异常主要呈现在响应幅度的变化, 当信号完全断开后, 信号衰减表现为双阶段线性特征: 初期线性衰减速率最大, 随后大幅减缓, 进入末期的缓慢线性衰减, 直至完全消失。当测点位于软硬不均异常正上方时 (测点 3), 曲线变化最为剧烈, 在 0.500 04 ~ 0.500 08 s 的衰减过程中, 电场响应强度对数由 2.878 衰减至 -9.402。测点 2 与测点 4 的响应曲线相对于测点 3 而言较为温和, 且测点 2 在早期衰减速度最快, 电场响应强度对数明显低于测点 3, 但随着时间变化, 其变化曲线趋于平缓, 可能由于测点 2 位于地层软硬不均起始变化处, 相较于测点 3 离地表线圈距离更为接近, 由于早期信号主要反映上部较软地层的电性特征, 而晚期信号主要反应下部较硬地层的电性特征, 因此, 测点 2 在早期对地层异常表现出更高的敏感性。由此得出, 线圈下方软硬地层变化越剧烈响应强度越大, 线圈距离软硬不均异常处越远响应强度越小, 线圈获取异常处的地电信息越滞后。因测点位置不同致使软硬地层的电场响应强度有所差异, 但变化趋势基本趋于一致, 符合瞬变电磁超前探测理论, 能够识别地层软硬不均异常。

根据软件数值模拟计算结果, 选取平面 YOZ ($X = 0$), 如图 6 所示, 分析 5 个测点在 0.500 04 ~ 0.500 08 s 时间段瞬变电磁的电场响应, 研究瞬变电磁在传播过程中的响应特征, 如图 7 所示。

通过对比分析可以发现:

1) 由于地表下方存在软硬不均地层, 致使电场响应结果呈现不规则对称现象。当线圈位于地层软

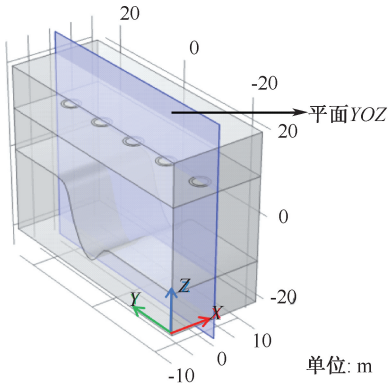


图6 切面YOZ
Fig. 6 Cross-section YOZ

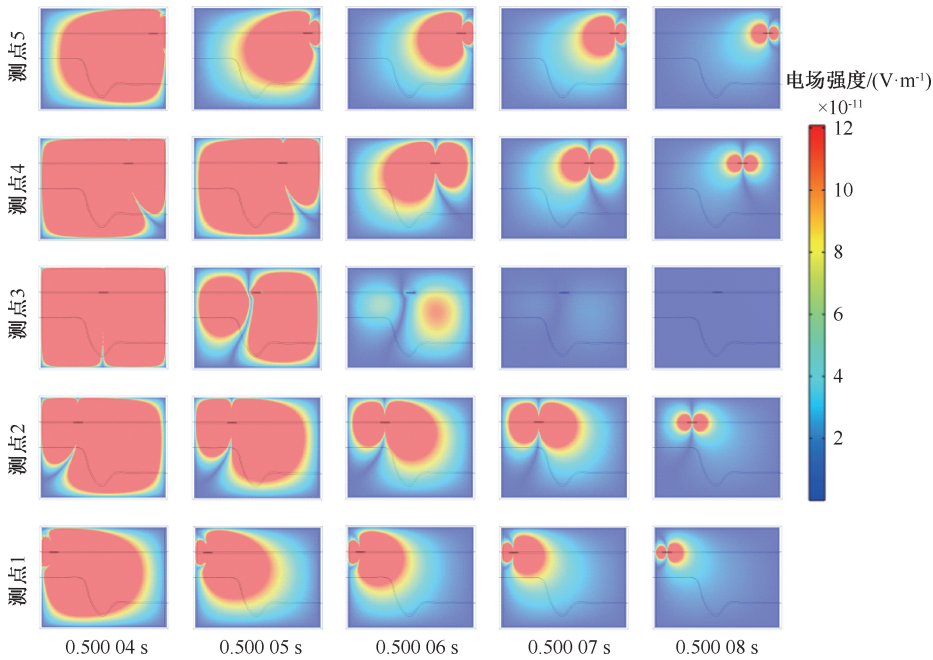


图7 不同时刻YOZ切面电场响应结果
Fig. 7 Electric field response results on the YOZ cross-section at different times

以发现,距离软硬不均区域越近的位置,电场的衰减速度越快,这与远离该区域的位置形成鲜明对比。

综上所述,由于测点2与测点3的电场响应结果对比较为明显,根据软件数值模拟计算结果,现选取2个平面XOZ($Y_1=10, Y_2=0$),如图8所示,分析测点2与测点3在0.50004~0.50008s时间段瞬变电磁的电场响应,研究瞬变电磁在传播过程中的响应特征,如图9所示。

由图9可知:

1) 电场衰减与地层特性之间的关联,及地层存在软硬不均的情况,并且线圈正好位于其上方时,电场的响应会变得异常活跃,表现出剧烈的数值波动。

2) 电场的衰减速度不仅受到介质性质(如空气、硬质地层和软质地层)的影响,还与地层软硬不

硬不均处正上方(测点3)时,电场响应变化最为明显,其数值波动尤为剧烈。 $Y=0$ m处,由于左侧地层变化幅度大于右侧地层变化幅度,致使左侧电场变化剧烈程度远快于右侧,这与实际情况相符合。

2) 在软硬不均异常地层附近,电场呈现明显的凹陷现象,该现象与电磁场在空气、硬地层与软地层中由快到慢的衰减特征密切相关。图7中测点3瞬变电磁电场响应衰减速度最快,这与图5中的曲线结果相吻合。

3) 电场衰减的具体形态与地层软硬不均区域距离地表线圈的远近有着密切的关系。对比0.50008s时电场响应图中“凹陷”处的两端,可

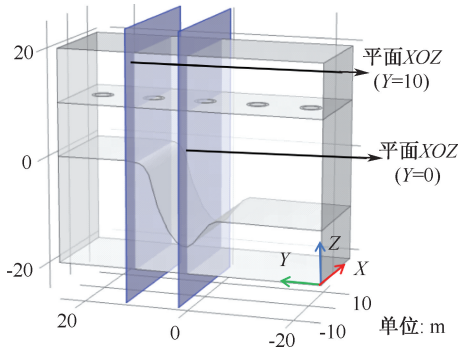


图8 切面XOZ
Fig. 8 Cross-section XOZ

均区域距离地表线圈的远近密切相关,电场在软硬地层交界处的“凹槽”现象两端展现出不同的衰减特性。靠近软硬不均区域的位置,电场衰减速度快,

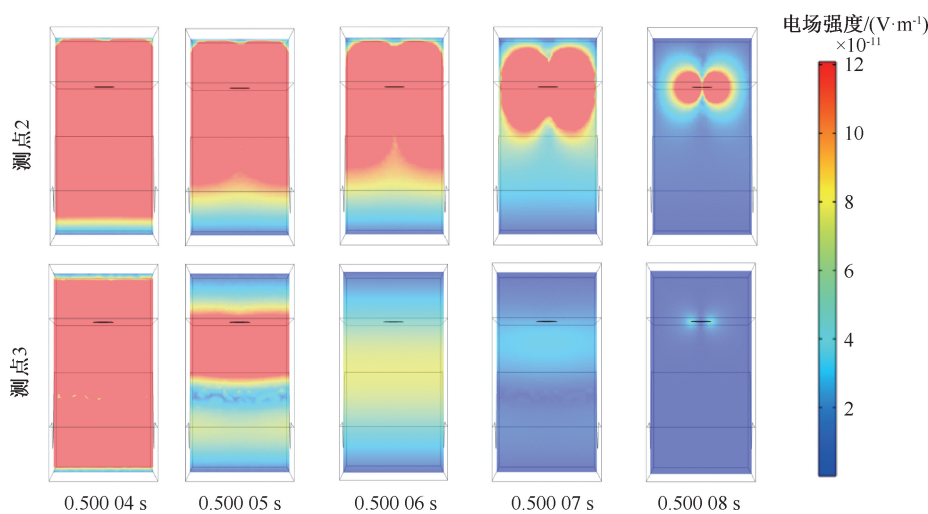


图 9 不同时刻 XOZ 切面电场响应结果

Fig. 9 Electric field response results on the XOZ cross-section at different times

而远离该区域的位置则衰减得更慢。

4 模拟验证情况及异常特征

为验证数值模拟的有效性,以青岛市地铁盾构隧道地面超前探测为例,研究瞬变电磁超前探测地层软硬不均地层可行性及电磁异常特征。

探测长度为隧道工作面前方 46 m,沿地铁隧道轴线布设 1 条瞬变电磁测线,每间隔 2 m 布设一个测点,总共 24 个测点。在探测过程中,将发射与接收线圈平铺于地面,确保与地面耦合良好,避免悬空或倾斜产生误差。鉴于瞬变电磁对低阻体敏感的特性,为避免电磁干扰,在启动发射电流时避开城市电磁噪声(如供电系统、金属管道)干扰。每个测点重复采集 2~3 次以验证一致性,并实时检查数据质量,剔除畸变数据。将所得数据经过软件分析得到瞬变电磁成果,如图 10 所示。

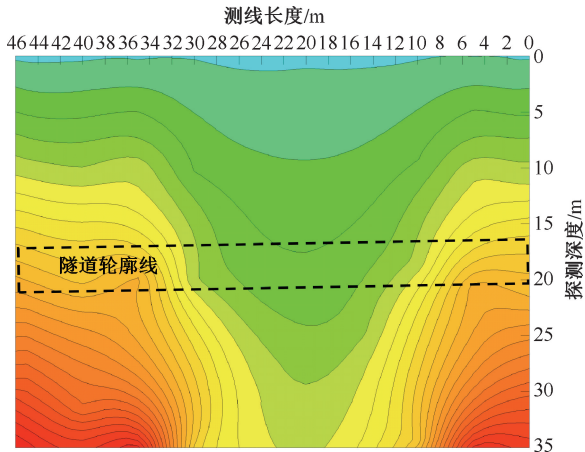


图 10 视电阻率等值线

Fig. 10 Apparent resistivity contour

从图 10 可以看出:

- 1) 在测线 5~35 m 附近,深度在 20 m 左右存在地层软硬不均电磁异常,软地层呈现低阻异常,而硬地层呈现高阻异常,符合地层分布情况。视电阻率所反映的软硬不均地层的电位差与图 9 模拟得到的电场响应结果,两者异常特征在空间分布上一致。根据现场数据得到的视电阻率等值线图验证了模型与模拟结果的可靠性。该异常在施工过程中得到了验证,此段围岩整体富水性相对较强,围岩稳定性相对较差。
- 2) 地铁隧道轮廓穿越软硬不均地层时,会出现从低阻到高阻或从高阻到低阻的现象,隧道在盾构开挖过程中,地层分布不均,隧道围岩可能出现较大变形,严重时隧道拱顶围岩可能失稳垮塌,地下水将加深这一不利影响。
- 3) 地层软硬不均异常主要为同一区域内,不同部分的岩体因风化作用和沉积环境的影响,导致其物理性质和强度差异较大。通常情况下,风化强烈的岩体会变得松散、破碎,抗压强度和变形能力较低,表现为软弱岩体或土体且富水性较好;而风化较轻的岩体则保持较好的结构和强度,具有较高的抗变形性能且富水性较差。这种异常在视电阻率等值线图上显示为等值线小范围内波动幅度增大,视电阻率数据表现为低阻异常。

5 结 论

- 1) 地层软硬不均会导致电场响应幅度的显著变化。当地层存在软硬不均的异常时,位于该异常正上方的测点会记录到剧烈变化的曲线,并且这些

曲线会迅速衰减。尽管如此,不同测点的响应虽然存在差异,但整体趋势是一致的,这符合探测理论,并可用于识别地层软硬不均的异常。

2) 电场的衰减速度不仅受到介质基本性质的直接影响,还与地层软硬不均区域距离地表探测线圈的远近有着紧密的关系。随着测点与异常区域的距离增加,电场响应逐渐减弱,信息的获取也变得滞后,在软硬地层交界处的“凹槽”现象两端,电场展现出不同的衰减特性:靠近软硬不均区域的位置,由于地层结构的复杂性和介质性质的突变,电场衰减速度较快;而远离该区域的位置,由于地层结构相对稳定,介质性质变化较小,电场衰减得更慢。

3) 由于同一区域内,不同岩体受风化等因素作用,其物理性质和强度差异大,风化强烈的岩体松

散、抗压强度和变形能力低,而风化较轻的岩体结构好、强度高,导致不同地层呈现不同的视电阻率。通过现场论证,这种异常在视电阻率等值线图上表现为小范围波动幅度增大和低阻异常,及软硬地层中电场的衰减速度不同,与模拟得到的电场响应结果一致,验证了模型与模拟结果的可靠性。因此,当地铁隧道轮廓出现从低阻到高阻或从高阻到低阻的现象时,有可能是因为穿越软硬不均地层,需注意施工安全。

4) 文中研究尚未考虑地面建筑物、地层各向异性及裂隙水动态变化的影响,与实际地质条件存在一定差异。未来可通过各向异性介质模型、裂隙水动态耦合模拟,结合物理试验与现场勘察数据对比,提高数值模拟对实际工程环境的适应性与准确性。

参 考 文 献

- [1] 郭卫社. 软硬不均地层盾构技术的思考[J]. 隧道建设, 2016, 36(10): 196-201.
GUO Weishe. Reflecting on technologies for shield tunneling in heterogeneous ground[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(10): 196-201.
- [2] 杜闯东. 基岩破碎带与软硬不均等不良地层盾构掘进技术分析[J]. 隧道建设, 2015, 35(9): 920-927.
DU Chuangdong. Analysis on shield tunneling in fractured bed rock zones and upper-soft lower-hard ground[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(9): 920-927.
- [3] 吴瑞祥. 软硬不均地层盾构施工技术研究及地层扰动影响分析[J]. 建设机械技术与管理, 2021, 34(4): 62-64, 132.
WU Ruixiang. Shield construction technology in soft and hard stratum and its influence on stratum disturbance law[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2021, 34(4): 62-64, 132.
- [4] 王青松, 张拥军, 康与超. 青岛上软下硬复合地层隧道开挖变形规律研究[J]. 北方交通, 2024(1): 73-76.
WANG Qingsong, ZHANG Yongjun, KANG Yuchao. Research on the deformation law of tunnel excavation in Qingdao's upper soft and lower hard composite strata[J]. Northern Communications, 2024(1): 73-76.
- [5] 刘畅. 基于上软下硬地层开挖风险处理及效果评价分析[J]. 价值工程, 2024, 43(6): 27-29.
LIU Chang. Risk management and effect evaluation analysis of excavation in upper soft and lower hard strata[J]. Value Engineering, 2024, 43(6): 27-29.
- [6] 伍小刚, 李天斌, 张中, 等. 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[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 163-170.
WU Xiaogang, LI Tianbin, ZHANG Zhong, et al. Improvement of the traditional transient electromagnetic method and its application to advanced geological forecast of tunnel[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 163-170.
- [7] 梁庆华. 矿井全空间小线圈瞬变电磁探测技术及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
LIANG Qinghua. The technology and application of mine full-space transient electromagnetic detection by small coil[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [8] 高晓耕. 斜井上部流砂层塌陷空洞纳米瞬变电磁法探测[J]. 中国煤炭, 2016, 42(8): 25-29.
GAO Xiaogeng. Research on detecting collapse holes in quicksand layer above inclined shaft by NanoTEM[J]. China Coal, 2016, 42(8): 25-29.
- [9] 张子强. 瞬变电磁法在隧道工程地质风险预测与评估中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(5): 671-677.
ZHANG Ziqiang. Application of transient electromagnetic method in geological risk prediction and assessment of tunnel

- engineering[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(5): 671–677.
- [10] 李辉,韩自强,陈棚. 瞬变电磁法在公路隧道地下水预报中的应用[J]. 隧道建设:中英文, 2019, 39(增 1): 355–360.
- LI Hui, HAN Ziqiang, CHEN Peng. Application of transient electromagnetic method in groundwater prediction of highway tunnel[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S1): 355–360.
- [11] 郑洪斌,赵学敏. 基于 COMSOL 模拟的瞬变电磁法在隧道超前地质预报中的应用[J]. 公路, 2023, 68(6): 469–474.
- ZHENG Hongbin, ZHAO Xuemin. Application of transient electromagnetic method in tunnel advanced geological prediction based on COMSOL simulation[J]. Highway, 2023, 68(6): 469–474.
- [12] 王春源,张桓,马洪亮,等. 浅埋深线圈瞬变电磁场超前探测响应及应用[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 75–81.
- WANG Chunyuan, ZHANG Huan, MA Hongliang, et al. Advanced detection response and application of transient electromagnetic field of shallow buried deep coil[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 75–81.
- [13] GUO Changang, TAN Tingjiang, MA Liuzhu, et al. Response and application of full-space numerical simulation based on finite element method for transient electromagnetic advanced detection of mine water[J]. Sustainability, 2022, 14(22): DOI:10.3390/SU142215024.
- [14] CHENG Jiulong, CHEN Ding, XUE Guoqiang, et al. Synthetic aperture imaging in advanced detection of roadway using mine transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(2): 190–198.
- [15] 薛国强,李貅,底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007(4): 195–200.
- XUE Guoqiang, LI Xiu, DI Qingyun. The progress of TEM in theory and application[J]. Progress in Geophysics, 2007(4): 195–200.
- [16] 张军. 瞬变电磁精细探测方法在隧道地质预报中的应用研究[J]. 能源与环保, 2019, 41(6): 33–38, 42.
- ZHANG Jun. Application study on TEM fine detection method in tunnel geological prediction[J]. China Energy and Environmental Protection, 2019, 41(6): 33–38, 42.
- [17] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1992: 5–30.
- [18] 孙静. 青岛市海滩沉积地貌及质量评价[D]. 青岛:中国海洋大学, 2012.
- SUN Jing. Sedimentary geomorphology of beaches in Qingdao city and their quality rating[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.

作者简介: 梁庆华 (1980—),男,山东日照人,博士,教授,主要从事地下工程水害探测等方面的研究。E-mail:85998349@qq.com。

