

富水构造异常体的直流电阻率法超前探测分析

姚陈飞^a, 王国富^b, 李红立^{*b}

(广西科技大学 a. 自动化学院, 广西 柳州 545616; b. 电子工程学院, 广西 柳州, 545006)

摘要: 直流电法超前探测技术是隧道掘进工作面超前预报的重要手段之一, 为研究异常体变化对直流电阻率法超前探测效果的影响, 建立几种含水低阻地质异常体三维模型, 采用三极法探讨了在三维空间中不同距离、不同大小、不同方位、不同测线布置下的低阻地质异常体直流电法超前探测响应特征, 以及地质异常体与围岩之间电阻率差异变化对于直流电阻率法超前探测的影响。研究结果表明: 当异常体体积越大, 距离掘进面越近, 异常体与围岩之间电阻率差异越大; 异常体位于掘进面正前方不发生偏移时, 直流电法对异常体的响应越明显, 三极法得到的探测效果越好; 当异常体位于不同方位, 相应的测线也位于该方位时, 得到的探测效果最好, 可以有效避免对隧道的影响。

关键词: 直流电法; 超前探测; 低阻地质异常体; 数值模拟

中图分类号: U456.32; U452.11

DOI: 10.16375/j.cnki.cn45-1395/t.2023.04.007



0 引言

电阻率法是根据岩石、矿石之间导电性的差别, 研究岩石与矿石的电阻率变化, 进行地质勘探的一种有效方法^[1-2]。电阻率法对含水断层、富水溶洞等低阻地质体反应敏感, 分辨率高, 在边坡治理和超前探测方面具有独特的优势^[3-9]。

对于地质异常体超前探测问题, 不少学者利用直流电阻率法对该问题进行了大量的研究。黄俊革等^[10]通过构建全空间板状体模型, 计算得出了点电源电位解析解, 根据有限单元法得出坑道空腔对于极距较小的视电阻率幅值影响较大, 而不会对迎头前方地质体的异常响应造成较大的影响。鲁晶津等^[11]应用代数多重网格快速算法对二次场的有限差分问题进行求解得出巷道空腔对测量结果存在一定影响, 采用比值曲线消除该影响, 利用定点源对不同巷道面进行测量的方式来识别旁侧影响, 达到准确探测前方异常的目的。刘斌等^[12]针对直流电阻率法超前探测研究中理论研究落后于工程实践的现状和探查效果较差的问题, 利用有限单元法进行了正演, 并提出了一套干扰识别与去除技术, 形成了掌

子面前方有用信息提取的有效途径。马炳镇等^[13]通过巷道影响因子研究了巷道对全空间稳定电流场分布的影响, 得出巷道影响与巷道几何尺寸大小、供电电极布置及巷道围岩导电性有关。王小龙等^[14]利用COMSOL Multiphysics进行正演模拟, 根据巷道前方存在不同异常体时矿井超前探测视电阻率曲线的形态及极值点位置的不同, 得出相对于板状异常体, 超前探测对球状异常体探测效果更好。刘路^[15]从数值模拟、物理模拟与工程实验等3个方面, 对不同影响因素进行了研究, 得出离异常体较近测线的视电阻率曲线具有极值更明显、幅度变化更大、尾支收敛速度更快的特点; 通过多点源偏移处理, 可有效排除旁侧异常。张淼淼等^[16]进行了不同空间方位异常体的探测, 得到异常体存在倾斜角度非直立时, 探测的结果与真实的位置之间存在偏差, 导致异常的范围有所扩大, 应采取后期校正的方法来实现对异常体的准确定位。

上述研究主要分析了巷道的影响以及针对消除巷道影响提出的对策, 但对异常体的自身属性未进行有效分析, 因此, 有必要针对地质异常体电阻率值的大小、地质异常体方位、异常体的尺寸以及测

收稿日期: 2022-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(61761009)资助

第一作者: 姚陈飞, 在读硕士研究生

*通信作者: 李红立, 博士, 助理工程师, 研究方向: 综合地球物理的教学及研究, E-mail: 22723071@qq.com

线的布置等影响因素对异常体的响应特征进行研究,而且存在一定的可行性,可以有效地为直流电阻率法超前探测在实际生产中的应用提供一定的参考。

1 直流电法的基本性质

1.1 稳定电流场基本定律

根据场论的知识可知,点电源产生的电场遵循欧姆定律可以看成是稳定场,稳定电流场与静电场一样只存在数值上的改变,都是势场, E 为电场强度, σ 为电导率, ρ 为电阻率, j 为电流密度, U 为电位,用公式表示为

$$j = \sigma E = \frac{E}{\rho}, \quad (1)$$

$$E = -\text{grad}U = -\nabla U. \quad (2)$$

式(1)为欧姆定律的微分形式,式(2)为电场强度与电位关系式。

将式(1)和式(2)合并得

$$j = -\sigma \nabla U. \quad (3)$$

由于稳定电流场中除场源外任意一点电流密度的散度恒为0,即

$$\text{div} j = 0. \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)得

$$\text{div} \sigma \nabla U = 0. \quad (5)$$

在均匀介质情况下, σ 为常数,式(5)可变为

$$\text{div} \nabla U = \nabla^2 U = 0. \quad (6)$$

式(6)为拉普拉斯方程,是无源稳定电流场满足的微分方程。

1.2 稳定电流场的边值条件

如果不给出限定条件,微分方程会有无穷多个解,就无法确定电流场的具体分布情况,为了使微分方程有唯一解,需要给出定解条件。一般定解条件都在研究区域的边界上取得,所以应当设定边界条件,才能得到唯一的定解,一般边界条件分为以下3种情况。

1) 第一类边界条件, c 为常数, r 为点电源到边界点上的距离,直接给出无穷远 Γ_2 处边界:

$$U|_{\Gamma_2} = \frac{c}{r}. \quad (7)$$

2) 第二类边界条件, n 为地面边界的外法向,给出地面 Γ_1 处偏导边界:

$$\frac{\partial U}{\partial n}|_{\Gamma_1} = 0. \quad (8)$$

3) 第三类边界条件:

$$\frac{\partial U}{\partial n} + \frac{\cos(r,n)}{r} U = 0. \quad (9)$$

由于采用第一类边界条件,得到的电位值比解析解计算的电位值低,而采用第二类边界条件,得到的电位值比解析解计算的电位值高,因此,本文使用第三类边界条件,该条件是第一类和第二类边界条件的线性组合。

2 解析解与数值解误差分析

设全空间围岩电阻率为 $\rho_1 = 500 \Omega \cdot \text{m}$,供电电流 $I=1 \text{ A}$, R 为观测点到点电源的距离,在三维全空间中,点电源电位解析解表达式为

$$U = \frac{\rho_1 I}{4\pi R}. \quad (10)$$

为了说明数值解的误差能满足精度要求,表1通过COMSOL Multiphysics软件仿真的数值解与根据公式理论计算的解析解对比,电位的绝对误差约为0.139 4 V,存在该误差的原因与仿真软件各个物理量耦合计算有关,在直流电法超前探测方法中观测的是观测点的电位差,因此,该误差对数据处理的结果没有影响,通过对数值解及解析解的分析,应用COMSOL Multiphysics软件对点源场模型的电位进行模拟是可靠的。

表1 三维点电源模型电位误差对比

AM/m	数值解电位/V	解析解电位/V	绝对误差/V
6	6.492 1	6.631 5	0.139 4
10	3.840 3	3.978 9	0.138 6
14	2.702 8	2.842 1	0.139 3
18	2.071 1	2.210 5	0.139 4
22	1.669 5	1.808 6	0.139 1
26	1.391 4	1.530 3	0.138 9
30	1.187 1	1.326 3	0.139 2
34	1.031 1	1.170 3	0.139 2
38	0.908 0	1.047 1	0.139 1
42	0.808 3	0.947 4	0.139 1
46	0.725 8	0.865 0	0.139 2
50	0.656 7	0.795 8	0.139 1

注: AM 为供电点 A 到测量点 M 的距离。

3 直流电法数值模拟

由于含水溶洞具有低阻性质,为了模拟这种地质情况,用一个具有较低电阻率的块状体来代替含水溶洞进行模拟,另外假设围岩是由均匀介质组成的地质体,具有均匀电阻率,而且除了该异常体之外不含有其他地质异常体情况,块状异常体与隧道轴线垂直且是直立的。

3.1 不同电阻率值异常体数值模拟

为了研究围岩电阻率与地质异常体电阻率差异对直流电阻率法探测视电阻率响应的影响,含水构造异常体电阻率分别取10、50、100 $\Omega\cdot\text{m}$,对其进行数值模拟。

建立模型一围岩大小为500 m \times 500 m \times 500 m,围岩电阻率为500 $\Omega\cdot\text{m}$,截面积为20 m \times 20 m,厚度20 m,异常体位于掘进面正前方10 m远处,与掘进面中心在一条直线上,隧道空腔截面积为4 m \times 4 m,长度100 m,电阻率为10 $\Omega\cdot\text{m}$,采用三极装置,以掘进面中心O点为原点,在地下A点(0,0,-2)供电,A点位于掘进面与底板相交的中轴线上,测量点M点和N点也位于中轴线上,电流为1 A,AM极距6 m,MN极距为4 m,异常体不同电阻率模型示意图如图1所示。

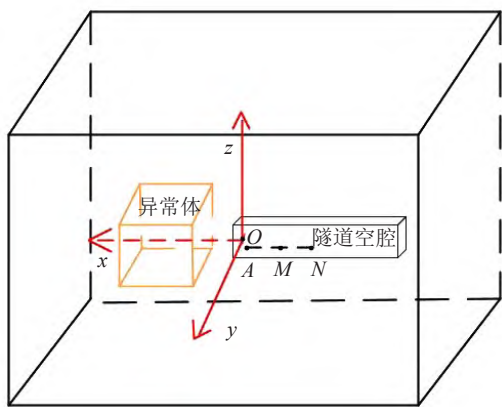


图1 (网络版彩图) 异常体不同电阻率模型示意图

图2为不同电阻率异常体情况下的视电阻率曲线对比图。从图2视电阻率响应曲线分析来看,围岩电阻率与地质异常体电阻率差异越大,曲线异常幅值越大,对应的极值点越低,对异常体的响应越明显;随着围岩电阻率与地质异常体电阻率之间的差异减小,曲线异常幅值减小,对应的

极值点上移,且尾支位置数值趋于围岩电阻率值。说明围岩电阻率与地质异常体电阻率差异越大,探测效果越好,当异常体电阻率为10 $\Omega\cdot\text{m}$ 时,探测效果最佳。

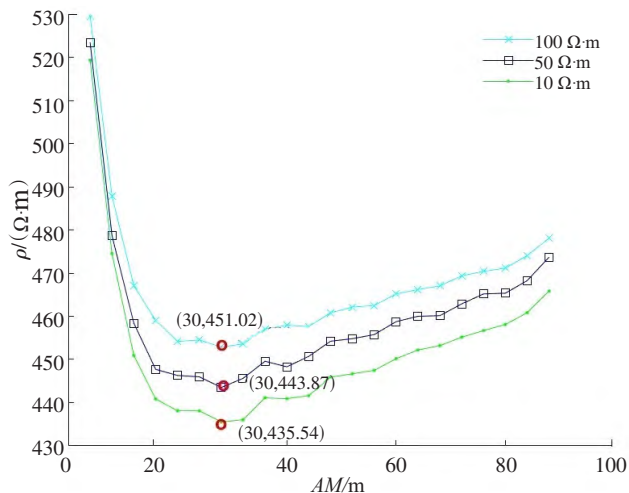


图2 (网络版彩图) 异常体不同电阻率正演结果

3.2 异常体距掘进面不同距离数值模拟

为了研究异常体距掘进面不同距离对超前探测视电阻率响应的影响,当异常体电阻率为10 $\Omega\cdot\text{m}$,大小为20 m \times 20 m \times 20 m时,改变异常体正对掘进面距离为10、30、50、70 m位置,对其进行数值模拟,其他物性条件与模型一相同,异常体距掘进面不同距离模型示意图如图3所示。

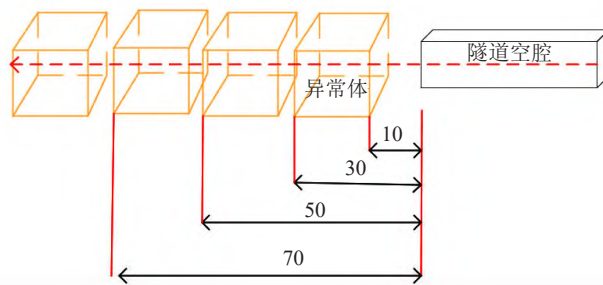


图3 (网络版彩图) 异常体距掘进面不同距离模型示意图
(单位: m)

图4为异常体距掘进面不同距离的视电阻率曲线对比图。由图4视电阻率响应曲线可知,地质异常体距点电源越近,极值点越低,异常幅值越大。当地质异常体在距点电源50 m和70 m处,异常幅值变化一致,极值点重合,说明大于50 m之后,对于异常体的探测距离远近已经分辨不出,通过比较极值点的位置以及异常幅值的大小可以得出,当异常体电阻率为10 $\Omega\cdot\text{m}$ 时,在块状异

常体位于掘进面正前方 10 m 处, 探测效果最好。

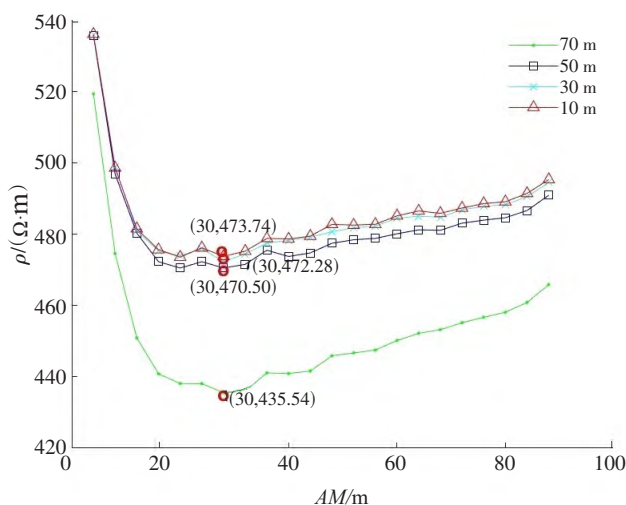


图4 (网络版彩图) 异常体距掘进面不同距离正演结果

3.3 不同异常体大小数值模拟

为了研究异常体大小对超前探测视电阻率响应曲线的影响, 当异常体电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 时, 在块状异常体位于掘进面正前方 10 m 处, 建立不同尺寸大小的异常体模型进行对比分析, 改变正方体边长 a 分别为 2、5、10、20 m, 进行数值模拟, 其他物性条件与模型一相同。掘进面前方不同尺寸异常体示意图如图 5 所示。

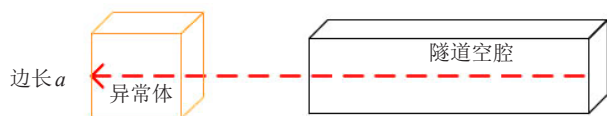


图5 (网络版彩图) 掘进面前方不同尺寸异常体示意图

图 6 为采用三极装置点电源正前方不同尺寸大小的异常体正演结果(视电阻率)曲线对比图。从图 6 的 5 条曲线可以看出, 4 条曲线都出现异常幅值不同程度的变化, 除了前方无异常体的情况外, 其他 4 条曲线都呈现先下降后上升的趋势, 随着异常体的体积逐渐减小, 极值点不断上移, 异常幅值逐渐减小。根据异常幅值和极值点的变化, 尺寸为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 、 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 、 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的异常体最大幅值分别只有 25、28 和 40 $\Omega \cdot \text{m}$, 尺寸为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的异常体幅值最大达到 64 $\Omega \cdot \text{m}$, 是其他尺寸大小异常体的 2 倍左右, 由此可以得出, 当异常体电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 时, 在块状异常体位于掘进面正前方 10 m 处, 直流电法对于 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 尺寸的异常体探测效果明显好于其他尺寸的异常体探测效果。

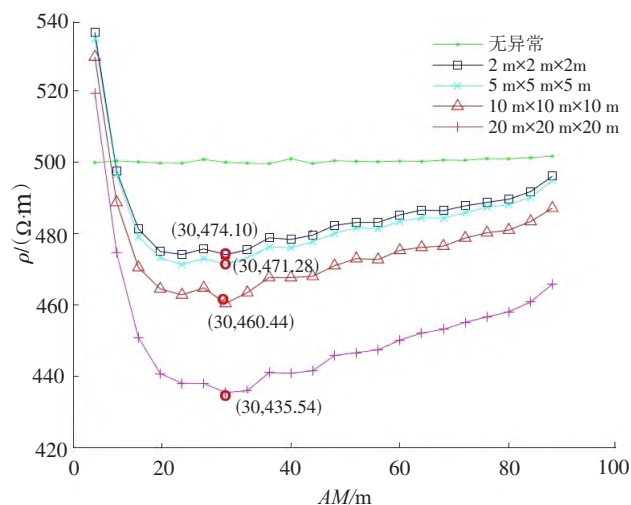


图6 (网络版彩图) 掘进面前方不同尺寸异常体正演结果

3.4 不同偏移方位数值模拟

为了研究掘进面前方异常体不同方位对超前探测视电阻率响应的影响, 当异常体电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$, 大小为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 时, 在块状异常体位于掘进面正前方 10 m 处, 将块状异常体向上偏移 15 m、不偏移以及向下偏移 15 m 进行对比分析, 其他物性条件与模型一相同, 掘进面前方不同方位异常体模型示意图如图 7 所示。

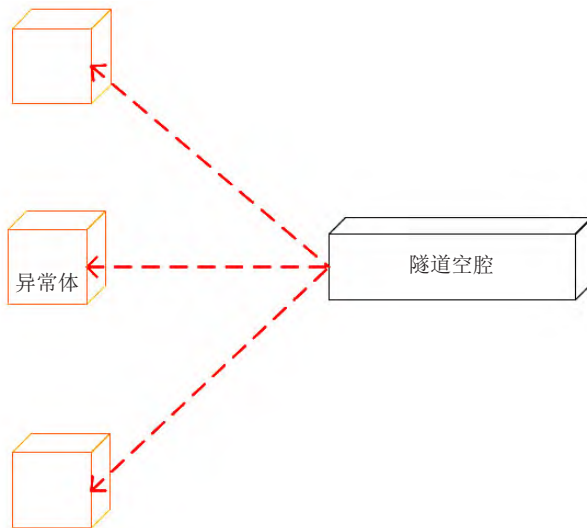


图7 (网络版彩图) 掘进面前方不同方位异常体模型示意图

图 8 为异常体分别发生向上、不偏移、向下偏移 15 m 视电阻率曲线对比图。从图 8 可以看出, 当块状异常体未发生偏移时, 视电阻率曲线极值点最小, 异常幅值最大, 随着异常体发生偏移, 视电阻率曲线极值点上移, 异常幅值逐渐减小, 根据正演结果可以得出, 当异常体大小为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 、电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 时, 在块状异常体位于掘进面正

前方 10 m, 不发生上下偏移时, 直流电法对于异常体的识别效果最好。

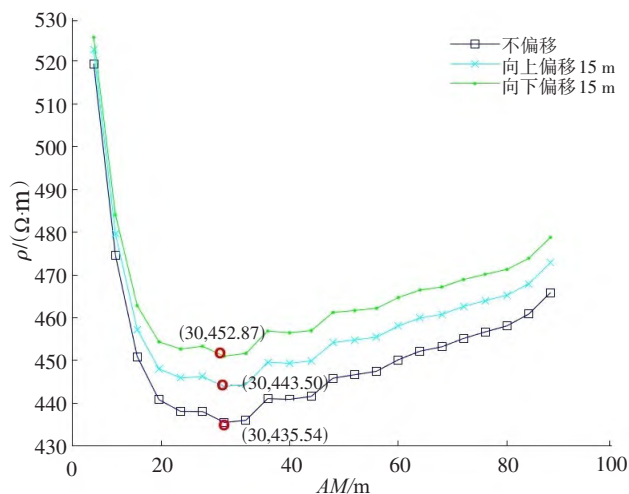


图8 (网络版彩图) 掘进面前方不同方位异常体正演结果

3.5 不同测线布置数值模拟

为了研究测线布置位置对超前探测视电阻率响应的影响, 假设平行隧道空腔左帮旁侧 15 m 处, 有一个边长为 10 m 的正方形异常体, 位于掘进面后方 20 m 处, 且掘进面前方无异常体, 测线 1 布置于隧道底板中轴线, 测线 2 布置于隧道底板与左帮相交位置, 测线 3 布置于左帮中轴线位置, 其他物性条件与模型一相同, 不同测线布置模型示意图如图 9 所示。

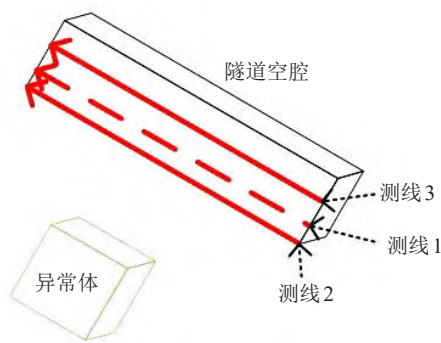


图9 (网络版彩图) 不同测线布置模型示意图

图 10 为不同测线布置视电阻率曲线图。从图 10 可以看出, 测线 3 异常幅值大于测线 2 异常幅值, 而测线 2 异常幅值大于测线 1 异常幅值, 测线 3 的极值点相较于测线 1 和测线 2 的极值点更低, 说明测线 3 的布置对于异常体探测效果更好。从上面的测线布置结果可以得出, 为了避免隧道空腔对探测结果产生较大的干扰, 针对不同方位的异常体, 需要在该方位布置测线进行观测, 可以得出有效的异常响应结果。

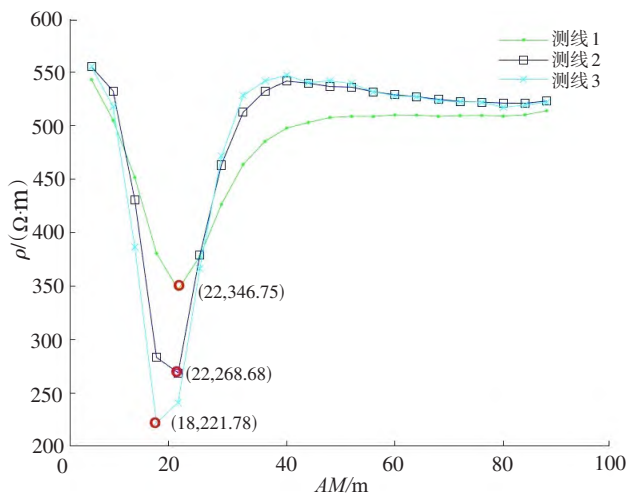


图10 (网络版彩图) 不同测线布置超前探测数值正演结果

4 结论

通过数值模拟, 分析研究了异常体电阻率大小、距离远近、方位偏移、体积大小以及测线布置等因素对直流电法超前探测效果的影响, 得出以下结论:

- 1) 采用 COMSOL Multiphysics 软件进行三维数值模拟, 对比数值解与解析解之间的误差, 直流电阻率法数值模拟精度较高, 能够满足精度要求。
- 2) 从不同电阻率地质异常体的视电阻率曲线来看, 当地质异常体与围岩之间的电阻率差异较大时, 异常幅值大, 极小值点小, 探测效果比较好。
- 3) 通过探测距点电源不同距离的地质异常体发现, 距离点电源 50 m 和 70 m 所得到的视电阻率曲线几乎重合, 无法分辨出它们的差异, 由此可以得出三极装置探测距离大于 50 m, 分辨率大大降低。
- 4) 对比不同尺寸大小的地质异常体, 当异常体的边长为 20 m 时, 所得到的异常幅值差异最大, 探测效果明显更好。
- 5) 对于正前方地质异常体是否发生偏移的情况, 当异常体未发生偏移时, 异常幅值最大, 极小值点最小, 探测效果最佳。
- 6) 对于异常体位于不同方位时, 测线需布置于该方位, 以减少隧道空腔对于异常体探测效果的影响, 以得到更好的探测效果。

参考文献

- [1] 岳建华, 刘树才. 矿井直流电法勘探[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.

- [2] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京：地质出版社，2005.
- [3] 张平松，刘盛东，曹煜. 坑道掘进立体电法超前预报技术研究[J]. 中国煤炭地质，2009，21(2)：50-53.
- [4] 石学锋. 矿井直流电法超前探测影响因素数值模拟[J]. 煤炭技术，2016，35(11)：122-124.
- [5] 占文锋，武玉梁，李文. 矿井直流电法全空间电场分布数值模拟及影响因素[J]. 煤田地质与勘探，2018，46(1)：139-147.
- [6] 周圆兀，韩晓伟，陈鲍. 基于不平衡推力法的边坡稳定性系数优化计算方法[J]. 广西科技大学学报，2016，27(1)：71-74.
- [7] 赵冠宇，王敬，翟培合，等. 基于 COMSOL Multiphysics 数值模拟的矿井直流电法超前探测研究[J]. 煤炭技术，2018，37(8)：177-179.
- [8] 胡雄武，张平松. 坑道隐伏陷落柱直流电阻率法超前探测分析[J]. 地球物理学进展，2019，34(3)：1176-1183.
- [9] 周圆兀，陈鲍，ANNIL M. 基于地震作用下传递系数法的边坡稳定性分析[J]. 广西科技大学学报，2017，28(1)：25-28.
- [10] 黄俊革，王家林，阮百尧. 坑道直流电阻率法超前探测研究[J]. 地球物理学报，2006，49(5)：1529-1538.
- [11] 鲁晶津，吴小平. 巷道直流电阻率法超前探测三维数值模拟[J]. 煤田地质与勘探，2013，41(6)：83-86.
- [12] 刘斌，李术才，李树忱，等. 隧道含水构造电阻率法超前探测正演模拟与应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2012，42(1)：246-253.
- [13] 马炳镇，李貅. 矿井直流电法超前探中巷道影响的数值模拟[J]. 煤田地质与勘探，2013，41(1)：78-81.
- [14] 王小龙，冯宏，李萍，等. 矿井电阻率超前探测正演模拟[J]. 煤炭科学技术，2011，39(11)：112-117.
- [15] 刘路. 矿井直流电阻率法三维超前探测技术研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2014.
- [16] 张淼淼，石显新. 不同空间方位异常体的直流电阻率法分析[J]. 科学技术与工程，2022，22(2)：481-487.

Advanced detection analysis of water-rich structural anomalies by DC resistivity method

YAO Chenfei^a, WANG Guofu^b, LI Hongli^{*b}

(a. School of Automation, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545616, China; b. School of Electronic Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: Direct current (DC) advanced detection technology is one of the important means of advanced prediction of tunnel facing. In order to study the influence of anomalous changes on the advanced detection effect of DC resistivity method, several three-dimensional models of water-bearing low-resistance geological anomalies were established, and the tripolar method was used to explore the response characteristics of the advanced detection of low-resistance geological anomalies under different distances, sizes, orientations and line arrangements in three-dimensional space, and the influence of the change of resistivity difference between geological anomalies and surrounding rock on the advanced detection of DC resistivity method. The results show that the larger the volume of the anomaly and the closer to the boring surface, the greater the resistivity difference between the anomaly and the surrounding rock. When the anomaly is located directly in front of the boring surface and does not shift, the more obvious the response of the direct current method to the anomaly, the better the detection effect obtained by the tripolar method. When the anomalies are located in different orientations and the corresponding measurement lines are also located in this orientation, the detection effect is the best, which can effectively avoid the impact on the tunnel.

Key words: direct current method; advanced detection; low-resistance geological anomalies; numerical simulation

(责任编辑：罗小芬)