第 44 卷　第 4 期
2023 年 4 月

仪　器　仪　表　学　报
Chinese Journal of Scientific Instrument

Vol. 44 No. 4
Apr. 2023

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210689

新型煤矿巷道随掘超前探测方法研究*

许少毅[1],卢文庭[1],王承涛[1],林嘉睿[2],邢方方[3]

(1. 中国矿业大学机电工程学院　徐州　221000; 2. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室　天津　300072;
3. 徐州工业职业技术学院　徐州　221140)

摘　要:本文提出了新型煤矿巷道随掘超前探测方法,为实现巷道掘进和超前探测并行作业提供了可行思路。首先,提出随掘超前探测方案,将掘进机的截割头作为随掘场源,融合物探方法与掘进主体;然后,构建随掘超前探测理论模型并获取测点电位变化规律,与有限元计算结果比对,验证了测点电位数值计算方法的准确性与可行性;最后,确定随掘场源的分流规则,以正常地质体作为参照,对比研究随掘过程中低阻和高阻两类不同异常体的视电阻率演化规律,当场源越接近低阻含水带,视电阻率均值降幅从 5.40% 提高至 29.80%,越接近高阻断层,视电阻率均值增幅从 7.12% 提高至 35.53%,水箱模拟实验表明,所提煤矿巷道随掘超前探测方法可实时、连续探测掘进工作面前方地质状况。

关键词: 随掘超前探测;煤矿巷道;直流电阻率法;智能掘进;掘进机

中图分类号: TH86　　**文献标识码**: A　　**国家标准学科分类代码**: 460.40

Novel advanced detection method with excavation in coal mine roadway

Xu Shaoyi[1], Lu Wenting[1], Wang Chengtao[1], Lin Jiarui[2], Xing Fangfang[3]

(*1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221000, China;*
2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221140, China)

Abstract: This article proposes a novel advanced detection method with excavation in coal mine roadway, which provides a feasible idea for the parallel operation of roadway excavation and advance detection. First, the scheme of advance detection with excavation is proposed, which uses the cutting head of the roadheader as the field source with excavation to integrate the geophysical prospecting method with the main body of the roadheader. Then, the theoretical model of advance detection with excavation is formulated to obtain the change law of the potential of the measuring point and compare it with the finite element calculation results. The accuracy and feasibility of the numerical calculation method of the measured point potential are evaluated. Finally, the diversion rules of the field source are determined, and the normal geological body is taken as a reference. The evolution law of the apparent resistivity of two different types of abnormal bodies, low resistivity and high resistivity, are compared and studied. When the field source is close to the low resistance water-bearing zone, the reduction for the average value of apparent resistivity is from 5.40% to 29.80%. If it is close to the high resistance fault, the average value of apparent resistivity increases from 7.12% to 35.53%. The water tank simulation experiment is carried out, and the results show that the proposed advance detection method with excavation in coal mine roadway can detect the geological conditions in front of the excavation face in real time and continuously.

Keywords: advance detection with excavation; coal mine roadway; direct current resistivity method; intelligent tunnelling; roadheader

收稿日期:2022-11-10　　Received Date: 2022-11-10

*基金项目:国家自然科学基金面上项目(52174153)、江苏省自然科学基金面上项目(BK20221545)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20221120)、精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金(PILAB2201)、中国矿业大学英才培育工程专项(优青)(2021YCPY0109)项目资助

0 引　　言

煤矿巷道智能化掘进是国际煤炭开采领域共同关注的前沿技术,智能掘进机是巷道掘进未来的发展方向[1-2]。智能掘进机在定位导航[3]、地图重建[4]、自主作业[5]等方面已经取得一定的突破,但是在超前探测领域方面仍处于空白阶段。“超前探测”技术是通过各种手段对勘探区域的岩石、地层、构造等地质情况进行调查研究[6]。对于煤矿巷道掘进而言,其超前探测主要是勘探掘进工作面前方是否存在断层、破碎带、含水带等地质异常体,如未进行超前探测而盲目向前掘进,则可能诱发突水、突泥、塌方等地质灾害,故在煤矿开采前进行超前探测尤为重要,目前超前探测方法有地震类方法[7]、电磁类方法[8]和电阻率类方法[9]等,国内外学者对此开展了大量研究。

关于地震类超前探测方法,彭苏萍等[10]阐述了一套基于绕射理论框架的地震勘探系统,提出绕射波精细速度建模方法,为透明矿山绿色开采提供解决方案。Song 等[11]提出了一种基于三维地震波探测的高分辨率巷道超前探测新技术,可提高探测深度、探测精度并生成更可靠的三维图像。Huang 等[12]为解决单分量地震勘探在地质构造方面的不足,提出了融合时频分析的三分量极化分析方法,提高了地质构造识别可靠性。高有湖等[13]为有效提高地震数据信噪比,通过卷积神经网络的方法研究了地震勘探数据去除随机噪声问题。

电磁类超前探测方法主要为瞬变电磁法,吴文刚等[14]设计一种瞬变/谐变一体化收发线圈,观测地下空间数据并进行融合处理,提高探测成像能力,实现更深层地下目标的探测。Cheng 等[15]基于粒子群优化算法提出了瞬变电磁法和直流电法联合反演方法,提高了不同位置异常体的识别精度。Zhou 等[16]提出了金属干扰下巷道瞬变电磁超前探测校正方法,并进行了有金属干扰和无金属干扰的水槽模型对比实验,用以对方法进行验证。

直流电阻率法是电法类超前探测的主要方法,周官群等[17]为避免巷道内复杂恶劣工况对测量信号的干扰,提出掘进工作面“三角锥”型直流电法超前探测方法,提高了煤矿井下巷道超前探测对水害和构造异常判别的准确性。王小龙等[18]在有限元软件中建立矿井巷道超前探测的三维地电模型,并分析巷道前方有不同形状异常体时的视电阻率曲线规律。Khorchani 等[19]对于突尼斯南部含水层系统由于过度开采而导致测压水位下降的情况,采用了直流电阻率法探测突尼斯南部含水层的地球物理特征,确定了含水层系统的结构和形态。

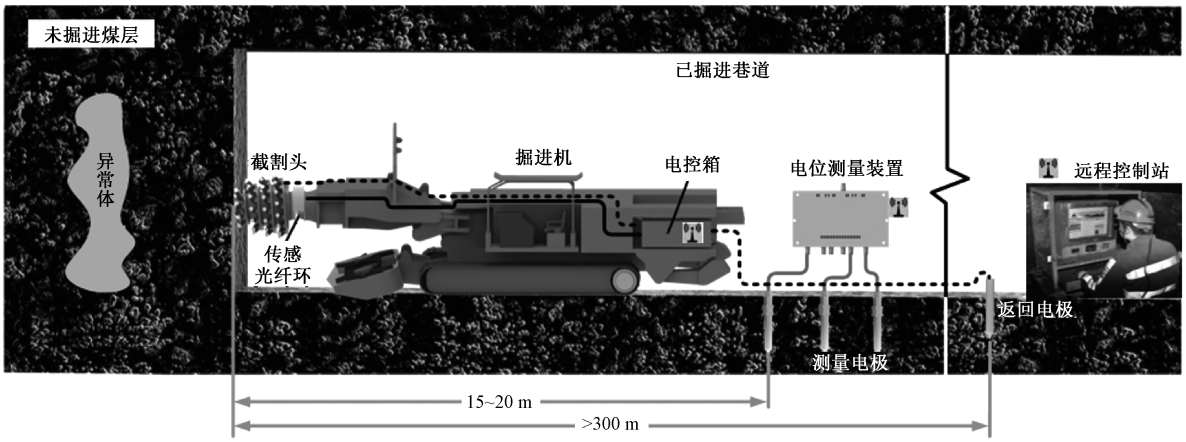
可以看出,目前国内外对超前探测的研究整体上是对某一类方法进行改进研究以提高探测深度、探测精度等,但普遍存在非实时性、非连续性且智能化水平低等共性问题。据此,部分研究学者提出随掘超前探测方法[20-23]。王季等[22]采集以掘进机震动为震源的随掘地震数据,在不影响掘进施工的条件下,实现了巷道前方地质条件的连续跟踪探测和实时监测。张平松等[23]对掘进机震源信号的脉冲化处理方面进行了一系列研究工作,提出了复合干涉处理算法提高脉冲化处理分辨率。

目前随掘超前探测方法因其利用掘进机截割头截割煤岩时产生的震动作为震源,与传统炸药震源相比其震动产生的能量较低,以及煤矿井下环境噪声复杂,故采集到的震源信号并不理想。基于此,本文融合掘进机主体与物探方法直流电阻率法,充分利用直流电阻率法分辨率高、对异常地质体反应敏感等优点,深入挖掘巷道掘进机的结构特征,提出采用截割头作为场源融合物探方法和掘进主体,为实现巷道掘进和超前探测并行作业提供了可行思路。首先,提出随掘超前探测方案,将掘进机截割头作为随掘场源,构建随掘超前探测理论模型,分析随掘理论模型中后方测点电位值变化规律,与有限元计算结果比对,验证了测点电位数值计算方法的准确性与可行性。然后,研究截割头场源电流的分流规则,以正常地质体为参照,对比研究随掘过程中低阻和高阻两类不同异常体的视电阻率演化规律。最后,开展水箱模拟实验,验证本文随掘超前探测方法的有效性。

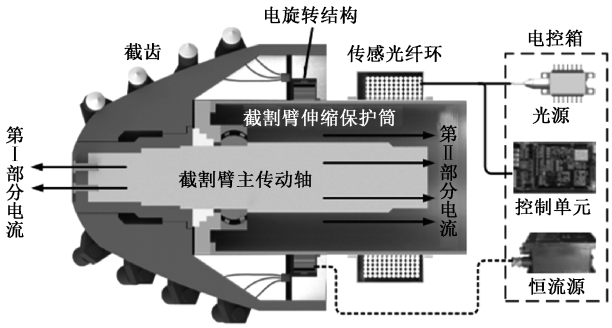
1　随掘超前探测方案与理论模型

1.1　随掘超前探测方案

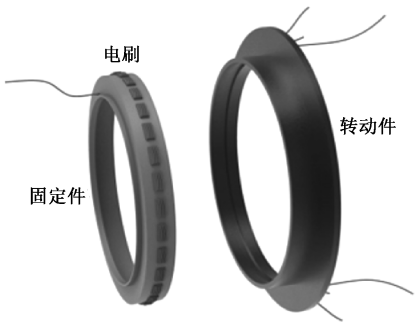
传统电法类超前探测方法为定场源发射电流,无法对突水、突泥和塌方等地质灾害实时连续感知及预警,且随着掘进工作面推进,需人工将探测装置沿推进方向移动,单次探测耗时费力。本文提出的煤矿巷道随掘超前探测方法如图 1(a)所示,充分调研经典物探方法—直流电阻率法,深入挖掘巷道掘进机的结构特征,将掘进机的截割头作为场源,在掘进机的电控箱中布置电流激励源,其正极通过导线连接至掘进机的截割头、负极连接返回电极,返回电极埋设在已掘进巷道的底板并远离截割头;将截割头作为场源,从正极输出大小可调节的激励电流并分成两部分,第Ⅰ部分沿截割头进入未掘进煤层后经底板和返回电极回到负极,第Ⅱ部分沿掘进机伸缩部、机身和履带进入底板后经返回电极回到负极,光纤电流传感器柔性成环缠绕在掘进机伸缩部如图 1(b)所示,用于检测第Ⅱ部分电流值,之后调节总的激励电流大小,以保证第Ⅰ部分电流大小恒定;在已掘进巷道布设测量电极,采集相邻测量电极间电位差,当掘进机向前掘进作业时,场源可随掘进作业移动并改变与测量电极的相对位置,此时后方测点电位差随着场源位置动态变化。



(a) 系统总体框图
(a) Overall block diagram of the system



(b) 掘进机截割头截面
(b) Section of cutting head of roadheader



(c) 电旋转结构
(c) Electric rotating structure

图 1 随掘超前探测系统图

Fig. 1 Diagram of the advance detection system with excavation

掘进作业中截割头旋转但激励源正极引出的导线保持静止,为解决截割头旋转时使导线缠绕问题,设计电旋转结构构建截割头与激励源导线的动静连接关系,如图 1(b)与(c)所示,其中,电旋转结构的固定件安装于掘进机伸缩部,电旋转结构的转动件与截割头内壁固联并引出导线和截齿连接,固定件与转动件通过电刷连接,激励源输出的第Ⅰ部分电流经固定件、电刷、转动件从截齿进入煤层。为实时获取截割头场源与测量电极之间的位置关系,采用基于捷联惯导/超宽带组合定位方法测量掘进机实时进尺,联立截割头场源与测量电极的初始距离,计算截割头场源与测量电极的动态距离,继而由测量电极间的电位差值、场源电流值、截割头场源与测点间距离以及相邻测点间距离等计算视电阻率值,实现对掘进工作面前方地质体的连续探测。

1.2 随掘超前探测理论

如图 2(a)所示,假设在均匀各向同性,电阻率为 ρ_1 的无限大围岩介质中有一半径为 r_0、电阻率为 ρ_2 的球形异常体。在距离球心 O 点为 d 处设置一个电流强度为 I 的场源 A(即为图 1 中掘进机截割头),测点 M 与场源 A 的距离为 R,与球心 O 的距离为 r,OM 连线与 OA 连线之间的夹角为 θ。

当球形异常体不存在时,场源 A 产生的电场定义为正常场,因球形异常体存在而产生的电场定义为异常场,则 M 点的电位由正常电位与异常电位互相叠加而成,即:

$$U_M = U_0 + U_1 \tag{1}$$

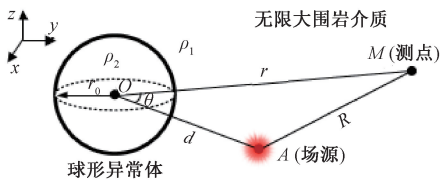
式中:U_0 为正常电位,即 $U_0 = I\rho_1/(4\pi R)$;U_1 为异常电位。

为求解异常电位 U_1,选取球坐标系,取球心 O 为坐标原点,异常电位满足下列形式的拉普拉斯方程:

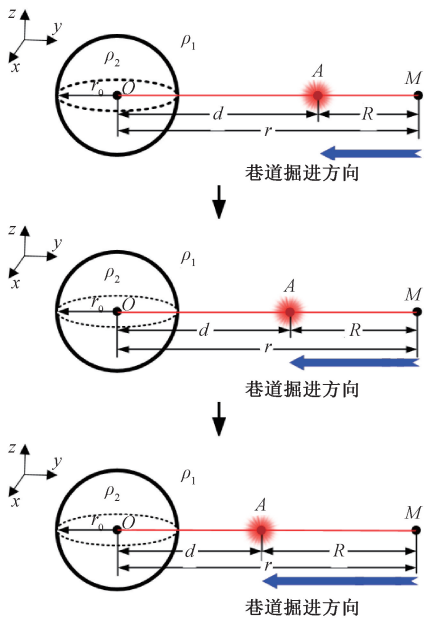
$$\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial U_1}{\partial r}\right) + \frac{1}{\sin\theta}\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial U_1}{\partial\theta}\right) = 0 \tag{2}$$

根据极值条件:1)球形异常体内异常电位为有限值,即 $r\to 0$ 时,U_1=有限值;2)球形异常体外无穷远处异常电位为 0,即 $r\to\infty$ 时,$U_1=0$。

以及边界条件:1)球形异常体表面两侧分界面电位值相等,即 $U_{内}=U_{外}$;2)球形异常体表面两侧分界面电流密度法向分量相等,即 $\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial U_{内}}{\partial r}=\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial U_{外}}{\partial r}$。式中 $U_{内}$ 为球



(a) 场源固定
(a) The field source is fixed



(b) 场源逐渐接近球形异常体
(b) The field source gradually approaches the spherical abnormal body

图 2　点源电流场球形异常体与测点位置关系图

Fig. 2　Position relationship between spherical abnormal body and measuring point in point source current field

内侧电位,$U_{外}$ 为球外侧电位。

求解式(2)可得异常电位 U_1 为:

$$U_1=\frac{I\rho_1}{4\pi}\sum_{n=0}^{\infty}\left[\frac{(\rho_2-\rho_1)n}{\rho_1 n+\rho_2(n+1)}\cdot\frac{r_0^{2n+1}}{d^{n+1}r^{n+1}}\cdot P_n(\cos\theta)\right] \tag{3}$$

式中:$P_n(\cos\theta)$ 为 $\cos\theta$ 的 n 次勒让德多项式。

由式(1)与(3)可求解 M 点电位为:

$$U_M=\frac{I\rho_1}{4\pi R}+\frac{I\rho_1}{4\pi}\sum_{n=0}^{\infty}\left[\frac{(\rho_2-\rho_1)n}{\rho_1 n+\rho_2(n+1)}\cdot\frac{r_0^{2n+1}}{d^{n+1}r^{n+1}}\cdot P_n(\cos\theta)\right] \tag{4}$$

当随掘超前探测时,场源与测线处于同一条直线,简化理论模型使球形异常体球心 O、场源 A、测点 M 处于同一条直线如图 2(b)所示,此时 OM 连线与 OA 连线之间的夹角 $\theta=0°$,当场源 A 向前移动时如图 2(b)所示,场源 A 与球心 O 的距离 d 减小,测点 M 与场源 A 的距离 R 增大,又因测点 M 与球心 O 的距离为定值,故 $R=r-d$,围岩电阻率 ρ_1 与球形异常体电阻率 ρ_2 为定值,故此时测点 M 的电位函数 U_{M0} 为距离 d 的函数:

$$U_{M0}(d)=\frac{I\rho_1}{4\pi(r-d)}+\frac{I\rho_1}{4\pi}\sum_{n=0}^{\infty}\left[\frac{(\rho_2-\rho_1)n}{\rho_1 n+\rho_2(n+1)}\cdot\frac{r_0^{2n+1}}{d^{n+1}r^{n+1}}\cdot P_n(1)\right] \tag{5}$$

设围岩电阻率 $\rho_1=500\ \Omega\cdot m$,球形异常体为低阻时电阻率 $\rho_2=10\ \Omega\cdot m$,球形异常体为高阻时电阻率 $\rho_2=3\ 000\ \Omega\cdot m$,球形异常体半径 $r_0=2$ m,场源 A 输入恒定电流 $I=1$ A,测点 M 与球形异常体球心距离 $r=10$ m,场源 A 与球形异常体球心距离 d 初始值为 6 m,当场源 A(即为图 1 中掘进机截割头)逐渐向前移动即 d 值逐渐减小,场源前方为不同类型球形异常体时,测点 M 电位函数对比曲线如图 3 所示。

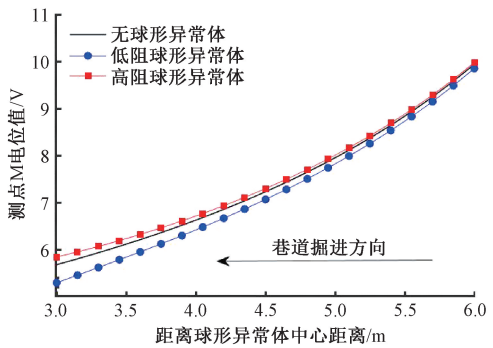


图 3　测点 M 电位函数对比曲线

Fig. 3　Comparison of potential function of the measuring point M

由图 3 可知当场源前方为高阻球形异常体时测点 M 的电位要高于无球形异常体时电位,且 d 值越小即场源越接近高阻球形异常体时,两种情况下测点 M 电位差值越大;当场源前方为低阻球形异常体时测点 M 的电位要低于无球形异常体时电位,且 d 值越小即场源越接近低阻球形异常体时,两种情况下测点 M 电位差值也越大。上述结论为本文随掘超前探测奠定了理论基础。

由于上述理论函数只能解析特定物理模型,然而在实际探测中由于矿井巷道的影响、异常地质体的规模形状具备随机特性,上述方法难以在井下复杂工况下进行计算,因此需采用数值模拟方法求解异常电位。本文采用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真平台求解随掘超前探测异常电位分布场,为验证 COMSOL Multiphysics 有限元软件进行异常电位求解的有效性,以上述无限空间低阻球形异常体模型为例,将数值模拟结果与理论函数解析解进行对比,如表 1 所示。

由表 1 可知,场源 A 向前移动逐渐接近球形异常体时,测点 M 电位值的函数解析解与数值模拟解之间的相对误差均值约为 1.123%,故采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件进行随掘超前探测异常电位的求解是可行的。

表 1 测点 *M* 的电位解析解与数值解对比

Table 1 Comparison of potential analytical aolution and numerical solution of measuring point *M*

距离 d/m	数值解/V	解析解/V	绝对误差/V	相对误差/%
6.0	9.905 97	9.857 86	0.048 11	0.488
5.5	8.497 92	8.734 93	0.237 01	2.713
5.0	7.695 08	7.827 23	0.132 15	1.688
4.5	7.074 84	7.071 60	0.003 24	0.046
4.0	6.361 88	6.422 95	0.061 07	0.951
3.5	5.782 48	5.844 58	0.062 10	1.063
3.0	5.250 68	5.299 04	0.048 36	0.913

2 随掘超前探测数值模拟

为了验证图 1 所述供电电源的输出电流在截割头处分流，一部分电流进入到煤层中形成探测电流，还有一部分电流通过截割臂返回形成非探测电流。首先建立掘进机截割头、截割臂、煤层和异常体的物理几何体，然后导入 COMSOL 有限元分析软件中在截割头上设定恒定激励电流 1 A，在煤层表面设置边界条件，并在截割臂的断面处设置电势边界条件以模拟断面后方掘进机主体，然后划分网格如图 4 所示，最后进行求解数据的可视化展示。

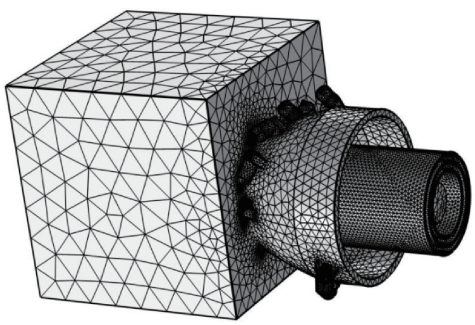
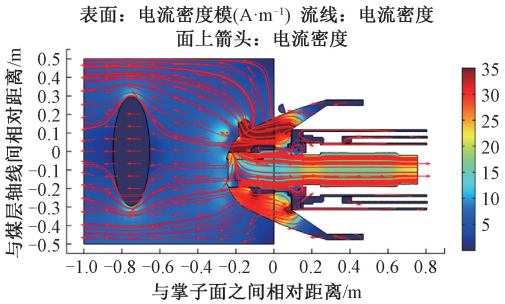


图 4 掘进机截割头、截割臂和煤层网格划分

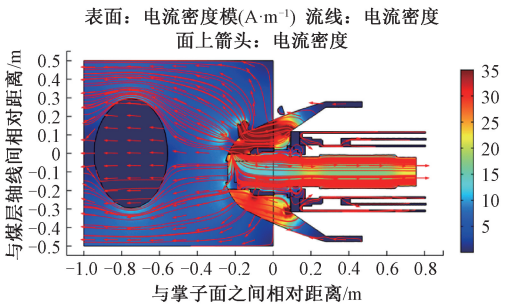
Fig. 4 Mesh of cutting head, cutting arm and coal seam in the roadheader

通过更改异常体的电阻率材料属性和几何体的形状大小，依次求解得到如图 5 所示比较结果。各图中都显示出截割头、截割臂、煤层和异常体整个物理几何体模型附近的电流分布情况，同时 4 幅图之间相互比较了小高阻异常体（如图 5(a)所示）、大高阻异常体（如图 5(b)所示）、小低阻异常体（如图 5(c)所示）及大低阻异常体（如图 5(d)所示）的仿真结果。从上述仿真结果的分析可知，验证了前述随掘超前探测方法中提出的从供电电源输出的电流，一部分进入煤层形成探测电流，一部分沿掘进机伸缩部返回形成非探测电流；并且得知探测电流的大小会受到异常体类型及大小的影响。



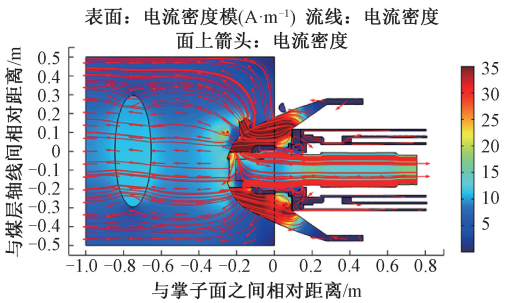
(a) 小高阻异常体

(a) Small high resistivity anomaly body



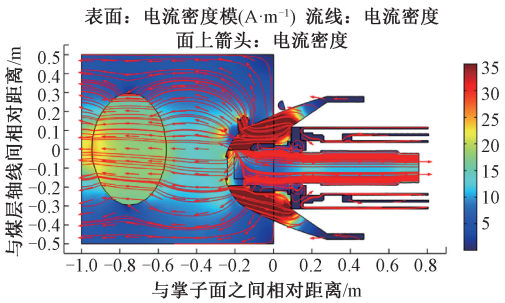
(b) 大高阻异常体

(b) Large high resistivity anomaly body



(c) 小低阻异常体

(c) Small low resistivity anomaly body



(d) 大低阻异常体

(d) Large low resistivity anomaly body

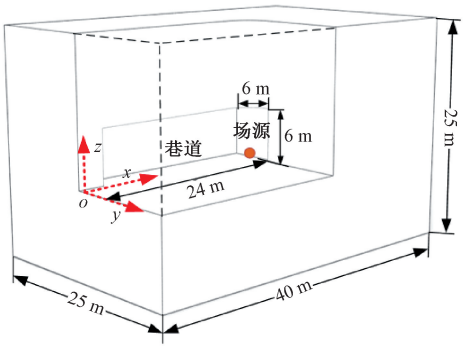
图 5 电流密度的分布云图

Fig. 5 The distribution nephogram of current density

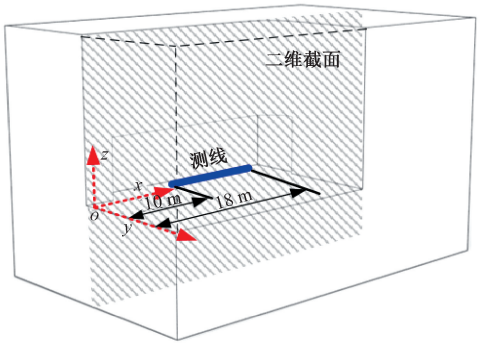
在已知截割头上电流可分流的前提下,为验证上述随掘超前探测方法在复杂环境下的有效性,将截割头简化为恒流点电源,分别构建掘进工作面前方存在低阻含水带和高阻断层两种情况下的有限元数值仿真模型,并对两种情况下测点电位的分布规律进行分析,计算其视电阻率与正常地质体进行比较,辨识掘进前方异常体类型。

2.1　掘进工作面前方为正常地质体

首先,分析掘进工作面前方为正常地质体时情况,在 COMSOL Multiphysics 有限元仿真平台中建立如图 6(a)所示的仿真模型,几何体长、宽均为 25 m,深度为 40 m,为模拟真实围岩条件,在几何体四周设置无限元域,设置几何体的电阻率为 500 Ω·m,在几何体上开挖一条长、宽均为 6 m,深度可调的矩形巷道;简化掘进机截割头为一个恒流场源,大小为 1 A,放置于巷道掘进工作面前方,恒流场源流出的电流即为第Ⅰ部分激励电流,为模拟掘进过程,场源沿 x 轴方向从模型中 24 m 处逐渐向前移动至 29 m 处;取如图 6(b)所示二维截面的电势,其电势仿真结果如图 7 所示。



(a) 模型总体示意图
(a) Overall schematic diagram

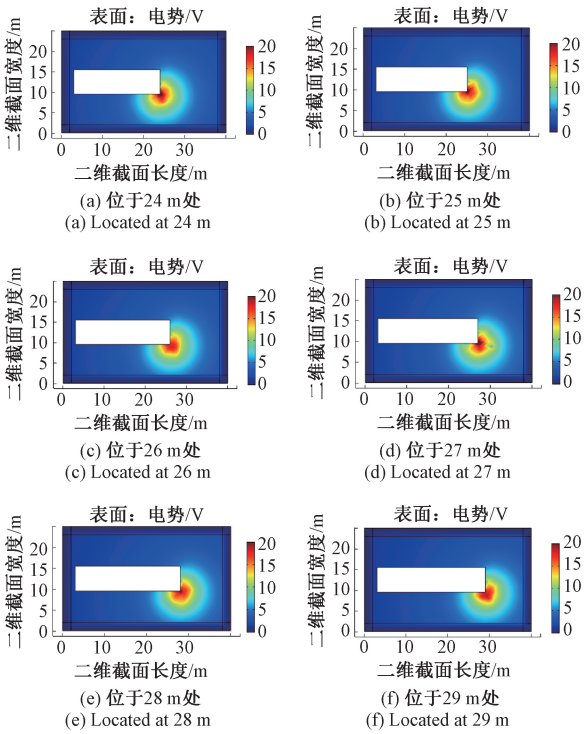


(b) 二维截面及测线位置图
(b) Location of 2D section and survey line

图 6　掘进工作面前方为正常地质体时仿真模型示意图

Fig. 6　Diagram of simulation model with a front normal geological body

本文所述的随掘超前探测方法在掘进机后方固定位置布置测点且掘进机向前掘进时测点位置不变,在模型



(a) 位于24 m处
(a) Located at 24 m

(b) 位于25 m处
(b) Located at 25 m

(c) 位于26 m处
(c) Located at 26 m

(d) 位于27 m处
(d) Located at 27 m

(e) 位于28 m处
(e) Located at 28 m

(f) 位于29 m处
(f) Located at 29 m

图 7　前方为正常地质体时不同场源位置下仿真电势分布

Fig. 7　Simulated potential distribution with front normal geological body under different field source positions

巷道深 10~18 m 处布置测点,如图 6(b)所示,提取测点位置电位数据,绘制电位曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出,无论场源位于哪一位置,测点电位呈现出近似的分布规律;随着测点与坐标原点距离不断增加,测点电位逐渐增加;随着场源与坐标原点距离逐渐减小,测点电位逐渐升高。与此同时,随着测点与坐标原点距离的增加,不同场源位置下测点的电位分布差异逐渐增大。

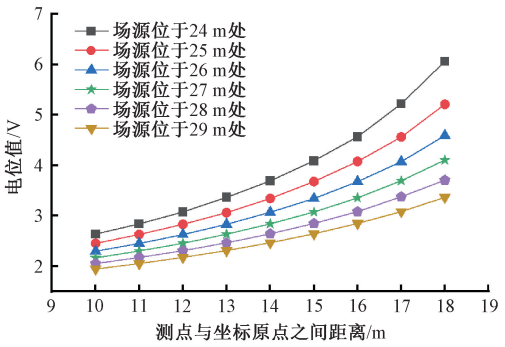


图 8　掘进工作面前方为正常地质体时测点电位曲线图

Fig. 8　Potential curve of measuring point with the front of heading face at normal geological body

由电位值计算视电阻率,设场源所在位置为 A 点,电流大小为 I,相邻两测点为 M、N 点,距离为 l_{MN},场源与两

测点之间的距离分别为 l_{AM}、l_{AN}，两测点之间的电压差为 ΔU_{MN}，由视电阻率计算公式：

$$\rho_s = \frac{4\pi \cdot l_{AM} \cdot l_{AN}}{l_{MN}} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} \tag{6}$$

根据式(6)计算工作面前方视电阻率，可知当掘进工作面前方为正常地质体时，视电阻率的值维持在一个定值附近，视电阻率均值为 462.74 Ω·m。故在此模型下当场源随掘进向前移动时，由后方测点测得电位值计算出的视电阻率值约为 462.74 Ω·m 时，则可认为掘进工作面前方无含水带或断层。

基于有限元仿真结果进一步分析本文随掘超前探测方法的运行时间，在随掘过程中每次探测距离约为 5~6 m，而实际煤矿巷道掘进日进尺通常小于 10 m，以日进尺 10 m 为例，理论上每日在随掘过程中仅需实施 2 次超前探测，为避免因井下复杂干扰导致的异常体漏测，本文设置电位采集频率为每掘进 1 m 时采集 1 次电位数据，日采集次数为 10 次，若井下掘进作业为 24 h 三班轮流接替模式，则每次采集及分析处理时长约为 2.4 h。此外，本文所提超前探测方法包含电位数据等信息的采集、数据传输与解算、异常体辨识结果报告预警 3 个步骤：1)从场源发生电流到后方测点采集到稳定电位数据，全部测点与电位采集装置之间采用并行通道；2)将全部测点所采集的电位数据等送达控制处理中心并进行数据解算和异常体辨识；3)异常体辨识结果依托井下光纤环网和无线通信发送至掘进工作面并报告。故在 2.4 h 的测量周期中，全部步骤均可完成，电位采集频率和探测流程设置可满足随掘超前探测的应用要求。

2.2 掘进工作面前方为低阻含水带

为模拟掘进工作面前方的低阻含水带，在几何体内部 30 m 处设置一个长、宽均为 20 m，深度为 4 m 的板状几何体模拟低阻含水带，如图 9 所示，设置低阻含水带电阻率为 25 Ω·m；低阻含水带位置固定，场源逐渐接近低阻含水带，其电势仿真结果如图 10 所示。由图 10 可以看出，在场源距离低阻含水带距离较远时，场源附近的电位分布有着明显的环形梯度特征，且电位较高；当场源伴随着掘进过程越来越接近低阻含水带时，由于场源附近的整体电阻率逐渐下降，因而导致场源位置的电位发生明显变化且逐渐降低，高电位区域逐渐消失。

提取测点位置电位数据并与 2.1 节正常地质体时电位数据进行对比，绘制正常地质条件与含低阻带地质条件的电位对比曲线如图 11 所示。从图 11 中可以看出，当掘进工作面前方有低阻含水带时测点电位值均低于正常地质体时测点电位值，与场源-低阻含水带的距离无关；与此同时，随掘场源与低阻含水带之间的距离越小，与正常地质条件相比，两者电位差值越大。

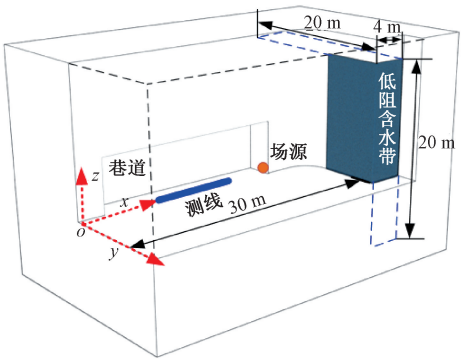


图 9 掘进工作面前方为低阻含水带时仿真模型示意图

Fig. 9 Diagram of simulation model with the front of heading face at low-resistance water bearing zone

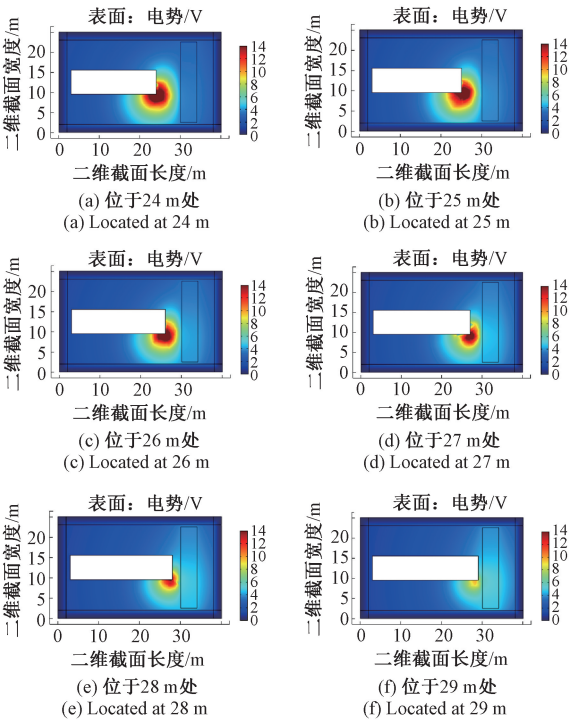
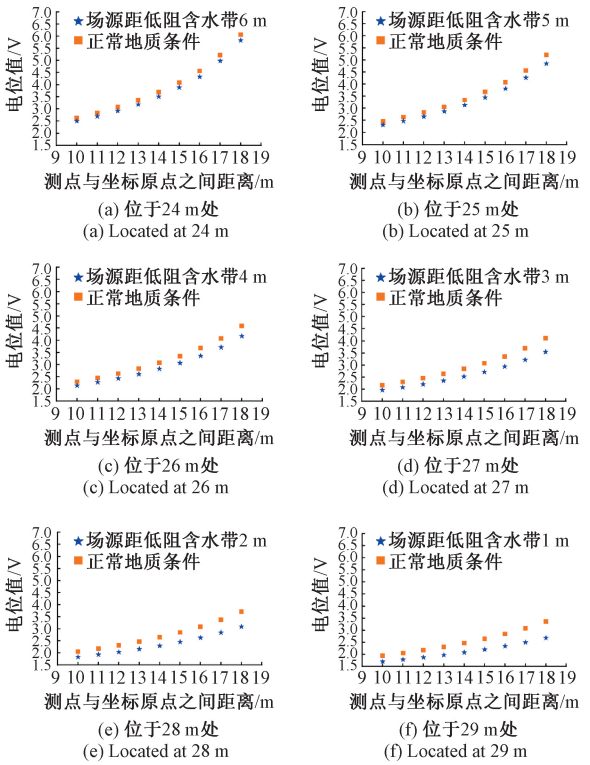


图 10 前方存在低阻含水带时不同场源位置下仿真电势分布

Fig. 10 Simulated potential distribution with front low-resistance water bearing zone under different field source positions

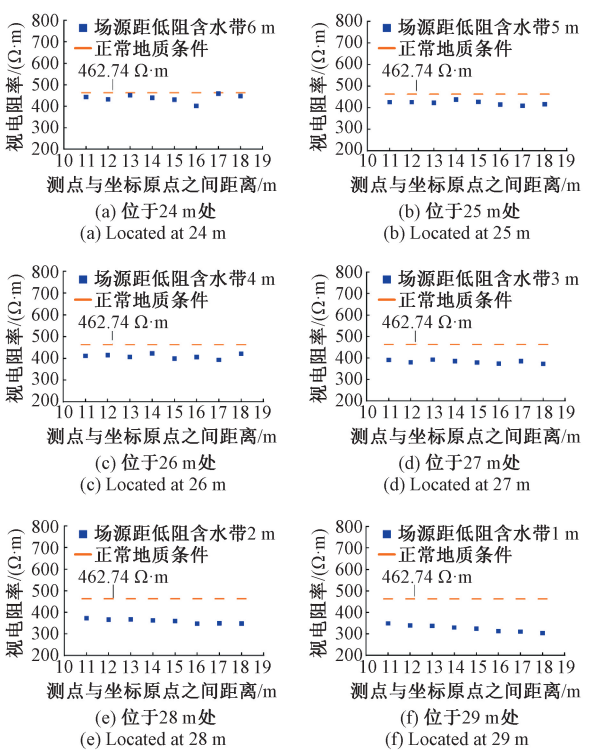
根据式(6)计算掘进工作面前方有低阻含水带时视电阻率值并与正常地质体视电阻率均值 462.74 Ω·m 进行对比，绘制视电阻率对比曲线，如图 12 所示。从图 12 中可以看出，当掘进工作面前方有低阻含水带时视电阻率值会低于正常地质体视电阻率值，当场源越接近低阻含水带时视电阻率值越低。计算场源随掘向前移动时视电阻率均值依次为 437.75、422.07、408.85、382.01、358.57、324.85 Ω·m，与掘进工作面前方为正常地质体时视电阻率均值 462.74 Ω·m 比较依次减小了5.40%、



(a) 位于24 m处
(a) Located at 24 m
(b) 位于25 m处
(b) Located at 25 m
(c) 位于26 m处
(c) Located at 26 m
(d) 位于27 m处
(d) Located at 27 m
(e) 位于28 m处
(e) Located at 28 m
(f) 位于29 m处
(f) Located at 29 m

图 11　前方存在低阻含水带时不同场源位置下测点电位对比

Fig. 11　Potential comparison with front low-resistance water bearing zone under different field source positions



(a) 位于24 m处
(a) Located at 24 m
(b) 位于25 m处
(b) Located at 25 m
(c) 位于26 m处
(c) Located at 26 m
(d) 位于27 m处
(d) Located at 27 m
(e) 位于28 m处
(e) Located at 28 m
(f) 位于29 m处
(f) Located at 29 m

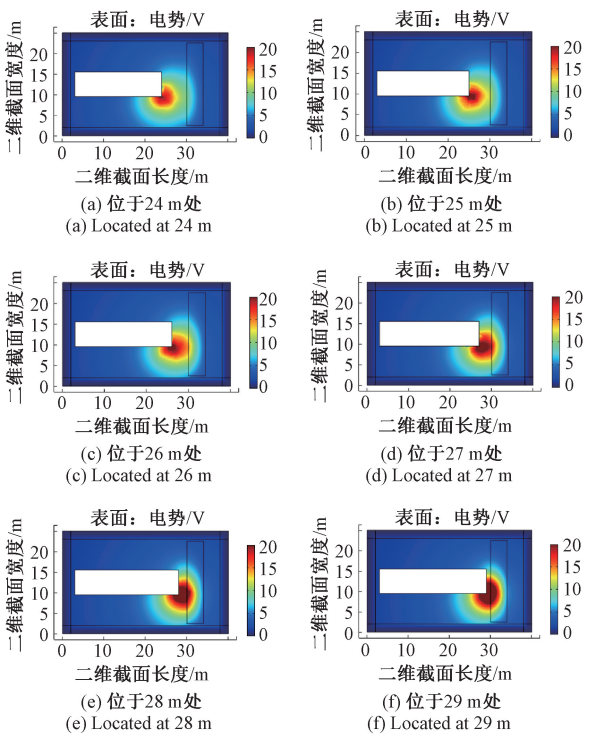
图 12　前方存在低阻含水带时不同场源位置下视电阻率均值对比

Fig. 12　Comparison of apparent resistivity with front low-resistance water bearing zone under different field source positions

8.79%、11.65%、17.45%、22.51%、29.80%,因此,可将视电阻率作为基本参数判断掘进工作面前方是否有低阻含水带。

2.3　掘进工作面前方为高阻断层

为模拟高阻断层,设置上述长、宽均为 20 m,深度为 4 m 的板状几何体,其电阻率为 3 000 Ω·m,高阻断层位置保持固定,场源逐渐接近高阻断层,重复与 2.2 节低阻含水带情况下相同的数值模拟过程,其电势仿真结果如图 13 所示。由图 13 可以看出,在场源距离高阻断层较远时,电位值较低;当场源伴随着掘进过程越来越接近高阻断层时,场源位置电位发生明显变化且逐渐升高,这是由于场源与高阻断层距离的减小,导致了场源附近整体电阻率的上升,因而导致场源位置附近电位逐渐升高。



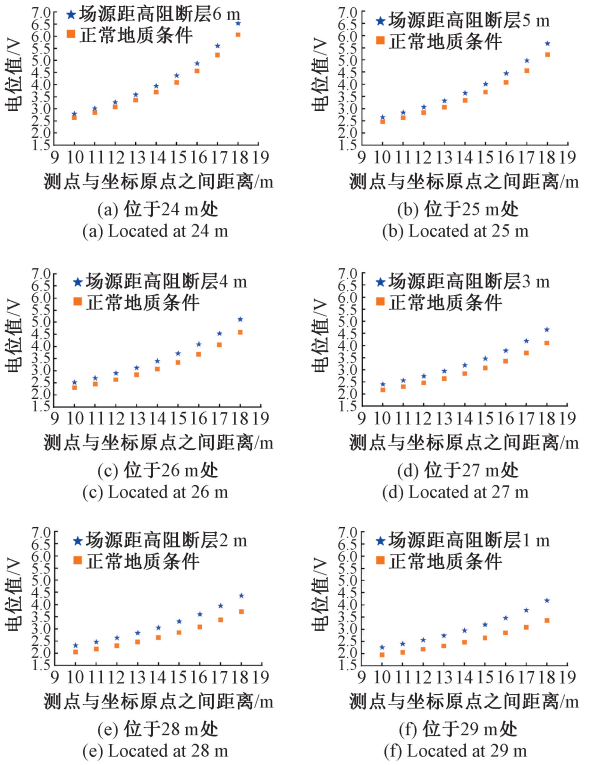
(a) 位于24 m处
(a) Located at 24 m
(b) 位于25 m处
(b) Located at 25 m
(c) 位于26 m处
(c) Located at 26 m
(d) 位于27 m处
(d) Located at 27 m
(e) 位于28 m处
(e) Located at 28 m
(f) 位于29 m处
(f) Located at 29 m

图 13　前方存在高阻断层时不同场源位置下仿真电势分布

Fig. 13　Simulated potential distribution with front high-resistance zone under different field source positions

提取测点位置电位数据与 2.1 节正常地质体电位数据进行对比,绘制电位对比曲线如图 14 所示。从图 14 能够看出,虽然存在高阻断层时电位分布规律与正常地质体时大致相同,但当掘进工作面前方有高阻断层时测点电位值要高于正常地质体时测点电位值,且场源随掘进越接近高阻断层时两者电位差值越大。

根据式(6)计算掘进工作面前方有高阻断层时视电阻率值并与正常地质体视电阻率均值 462.74 Ω·m 进行



(a) 位于24 m处
(a) Located at 24 m

(b) 位于25 m处
(b) Located at 25 m

(c) 位于26 m处
(c) Located at 26 m

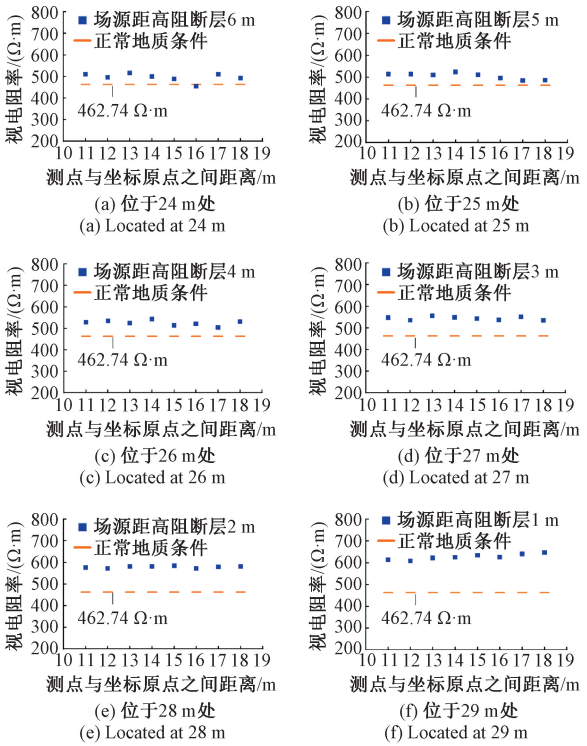
(d) 位于27 m处
(d) Located at 27 m

(e) 位于28 m处
(e) Located at 28 m

(f) 位于29 m处
(f) Located at 29 m

图 14 前方存在高阻断层时不同场源位置下测点电位对比

Fig. 14 Potential comparison with front high-resistance zone under different field source positions



(a) 位于24 m处
(a) Located at 24 m

(b) 位于25 m处
(b) Located at 25 m

(c) 位于26 m处
(c) Located at 26 m

(d) 位于27 m处
(d) Located at 27 m

(e) 位于28 m处
(e) Located at 28 m

(f) 位于29 m处
(f) Located at 29 m

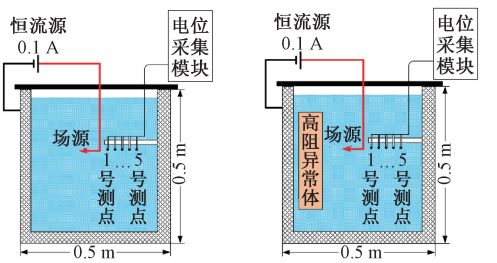
图 15 前方存在高阻断层时不同场源位置下视电阻率均值对比

Fig. 15 Comparison of apparent resistivity with front high-resistance zone under different field source positions

对比,绘制视电阻率对比曲线,如图 15 所示。由图 15 可知,当掘进工作面前方有高阻断层时视电阻率值会高于正常地质体视电阻率值,当场源越接近高阻断层时视电阻率值越高,计算场源随掘向前移动时视电阻率均值依次为 495.70、504.36、524.54、544.13、578.47、627.13 Ω·m,与掘进工作面前方为正常地质体时视电阻率均值 462.74 Ω·m 比较依次增加了 7.12%、8.99%、13.36%、17.59%、25.01%、35.53%,高阻断层条件下视电阻率的结果与低阻含水带相反,因此同样可将视电阻率值用于识别未掘进煤层中的高阻断层。

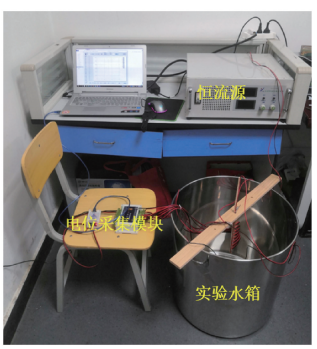
3 随掘超前探测实验研究

为进一步验证本文所提的随掘超前探测方法,模拟掘进过程中场源连续移动状态时,后方测点连续测量电位差值,最真实的接近随掘现场,设计随掘超前探测模拟实验平台如图 16 所示。该模拟实验在室内水箱均匀氯化钠溶液中进行,以此来模拟均匀煤层地质,水箱为不锈钢导电材质大小为 0.5 m×0.5 m,在水箱外壁粘连导线至电源负极,在水箱中固定布置 1~5 号 5 个测点,每个测点间隔为 0.005 m,场源在 1 号测点前方 0.09 m 处开



(a) 无异常体
(a) Normal body

(b) 含高阻异常体
(b) High resistivity abnormal body



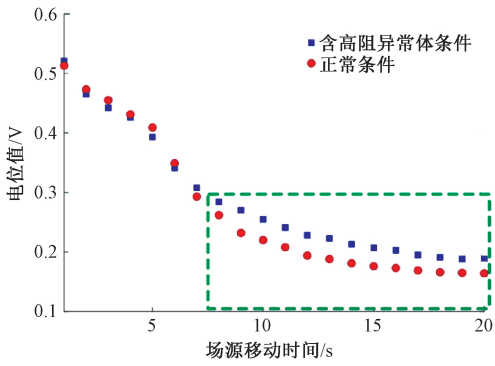
(c) 实验现场
(c) Experimental site

图 16 水箱模拟实验

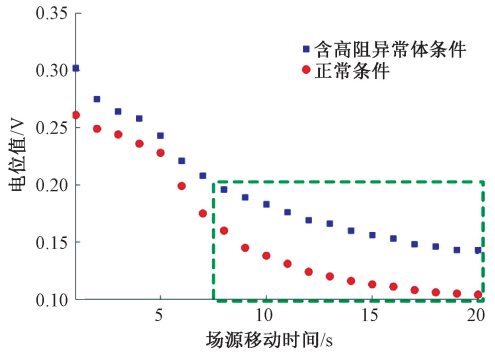
Fig. 16 Water tank simulation experiment

始以 0.003 m/s 的速度向前移动 20 s 的时间,场源为恒流源,大小为 0.1 A,以此来模拟场源随掘过程。

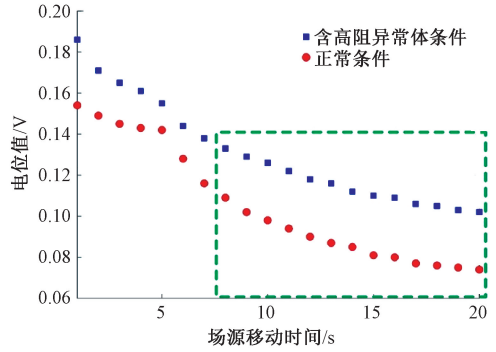
实验分为 2 个步骤进行:1)水箱中无异常体,场源随掘向前移动的过程中测量每两个相邻测点间的电压差,如 1 号测点与 2 号测点间、2 号测点与 3 号测点间,以此类推,可得到相邻测点间的电压差大小随场源移动时间变化曲线图。2)在水箱中布置一高阻异常体模拟高阻断层,场源逐渐接近高阻异常体,重复第 1 步测量步骤,采集相邻测点间的电压差。绘制两次实验电压差随时间变化曲线对比图,如图 17 所示。从图 17 中能够看出,当场源向前移动 8 s 以后逐渐接近高阻异常体时,每组测点的电位较无异常体时逐渐升高,符合数值模拟结果,根据欧姆定律,高阻异常体会抬升附近电位,因而导致测点位置的电位较高。进一步,由视电阻率公式计算视电阻率值,结果如图 18 所示,可见当场源向前移动 8 s 以后,有高阻异常体时视电阻率值要高于正常值。由于氯化钠溶液电阻率较低,如在前方布置低阻异常体测量效果较差,故本次实验只模拟了前方有高阻异常体时的情形。综合图 17 与 18 的电位分布和视电阻率测量结果,在氯化钠溶液中所模拟的高阻断层存在的条件下,实验所测视电阻率分别相对正常地质条件发生了明显的上升,因此视电阻率可作为掘进机随掘超前探测的基本参数,且模拟了掘进过程中场源连续移动的状态,后方测点也可连续测量电位差值,较传统方法场源为单点电源静态测量有较大提升,故本文提出的随掘超前探测方法可实时、连续探测掘进工作面前方地质状况。



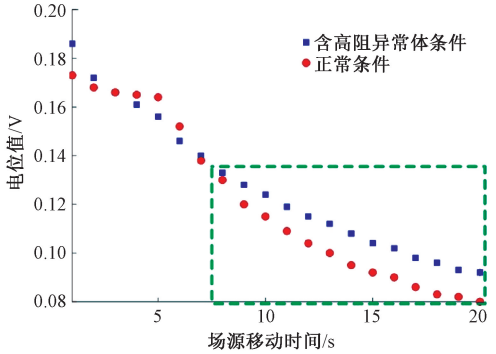
(a) 1号与2号测点
(a) Measuring points 1 and 2



(b) 2号与3号测点
(b) Measuring points 2 and 3



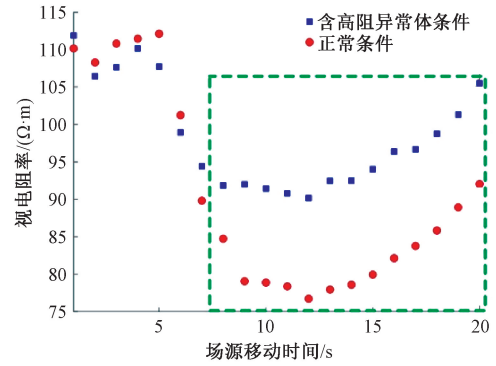
(c) 3号与4号测点
(c) Measuring points 3 and 4



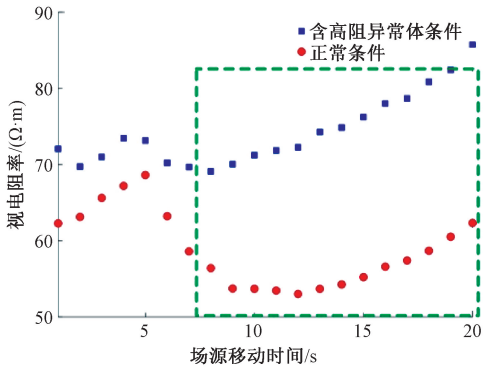
(d) 4号与5号测点
(d) Measuring points 4 and 5

图 17　前方存在高阻异常体时后方测点间电位差与正常条件时对比

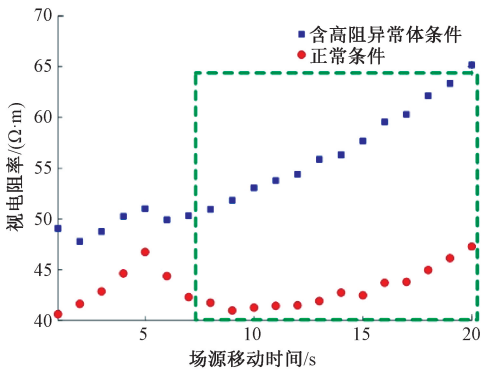
Fig. 17　Comparison of the potential difference between the rear measuring points with a high resistance abnormal body in front and under normal conditions



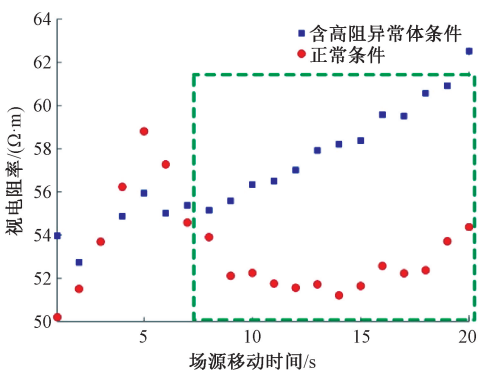
(a) 1号与2号测点
(a) Measuring points 1 and 2



(b) 2号与3号测点
(b) Measuring points 2 and 3



(c) 3号与4号测点
(c) Measuring points 3 and 4



(d) 4号与5号测点
(d) Measuring points 4 and 5

图 18 前方存在高阻异常体时视电阻率与正常条件时视电阻率对比

Fig. 18 Comparison of apparent resistivity with a high resistivity abnormal body in front and under normal conditions

4 结 论

智能掘进机是煤矿巷道掘进的主要发展方向,煤矿巷道超前探测是智能掘进中所必需的重要技术。为解决传统电法类探测中固定场源无法实时超前探测的难题,本文提出了一种新型煤矿巷道随掘超前探测方法,将掘进机截割头作为场源,在已掘进巷道布设测量电极,采集相邻测量电极间电位差,继而计算视电阻率的随掘超前探测方案。首先,构建了随掘超前探测理论模型,将理论函数解析解与数值模拟结果进行对比,验证了数值模拟的可行性;其次,开展了掘进工作面前方为不同类型异常体时的数值模拟及实验验证。数值模拟结果表明当掘进工作面前方有低阻含水带时视电阻率值会低于前方为正常地质体视电阻率值,当场源越接近低阻含水带时视电阻率值越低;当掘进工作面前方有高阻断层时视电阻率值会高于前方为正常地质体视电阻率值,当场源越接近高阻断层时视电阻率值越高。实验结果验证了数值模拟结果的正确性,表明煤矿巷道随掘超前探测方法的可行性,该方法可实时、连续探测掘进工作面前方地质异常体种类,为实现巷道掘进和超前探测并行作业提供了可行思路。

参考文献

[1] 张旭辉, 沈奇峰, 杨文娟, 等. 基于三激光点标靶的掘进机机身视觉定位技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(6): 178-186.
ZHANG X H, SHEN Q F, YANG W J, et al. Research on visual positioning technology of roadheader body based on three laser point target[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6): 178-186.

[2] 马宏伟, 王世斌, 毛清华, 等. 煤矿巷道智能掘进关键共性技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 310-320.
MA H W, WANG SH B, MAO Q H, et al. Key common technology of intelligent heading in coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 310-320.

[3] 张旭辉, 杨红强, 白琳娜, 等. 基于改进 RANSAC 特征提取的掘进装备视觉定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 168-177.
ZHANG X H, YANG H Q, BAI L N, et al. Research on the visual positioning method of tunneling equipment based on the improved RANSAC feature extraction[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 168-177.

[4] YANG J J, WANG CH, ZHANG Q, et al. Modeling of laneway environment and locating method of roadheader based on self-coupling and hector SLAM[C]. 2020 5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT), 2020: 263-268.

[5] 王苏彧, 马登成, 任泽, 等. 悬臂式掘进机断面成型轨迹多目标优化方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 183-192.
WANG S Y, MA D CH, REN Z, et al. A multi-objective

optimization method for cantilever roadheader section forming trajectory [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 183-192.

[6] 岳建华, 杨海燕, 冉华赓. 矿井电法勘探研究现状与发展趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 259-276.
YUE J H, YANG H Y, RAN H G. Research status and development trend of mine electrical prospecting [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 259-276.

[7] 胡兴涛, 朱涛, 苏继敏, 等. 煤矿巷道智能化掘进感知关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2123-2135.
HU X T, ZHU T, SU J M, et al. Key technology of intelligent drivage perception in coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2123-2135.

[8] 程久龙, 王慧杰, 徐忠忠, 等. 基于全卷积神经网络的钻孔瞬变电磁法岩层富水性预测研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 289-297.
CHENG J L, WANG H J, XU ZH ZH, et al. Research on aquifer water abundance evaluation by borehole transient electromagnetic method based on FCNN [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 289-297.

[9] 王敏, 刘玉, 牟义, 等. 多装置矿井直流电法巷道超前探测研究及应用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 396-405.
WANG M, LIU Y, MOU Y, et al. Research and application of multi-array mine DC electrical method for road-way advanced detection[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 396-405.

[10] 彭苏萍, 赵惊涛, 盛同杰,等. 煤田绕射地震勘探现状与进展[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 1-20.
PENG S P, ZHAO J T, SHENG T J, et al. Status and advance of seismic diffraction exploration in coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 1-20.

[11] SONG A, SONG B, QIAN R Y. Experiment of 3D seismic reflection technique for forward probing on TBM tunnel face[J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 2019, 24(4):609-619.

[12] HUANG L Y, WANG SH CH, SONG X J. Comparison study of three-component polarization analysis methods for seismic advanced detection in the roadway[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(23): 1276-1-8.

[13] 高有湖, 岳景杭, 孔军, 等. 一种基于卷积网络的地震探测数据随机噪声去除方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(1): 103-108.
GAO Y H, YUE J H, KONG J, et al. Random noise attenuation method for seismic exploration data based on convolutional network [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(1): 103-108.

[14] 吴文刚, 卞雷祥, 何勇, 等. 瞬变/谐变一体化的大地电磁收发线圈设计[J/OL]. 电子测量与仪器学报: 1-11[2023-04-06]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/11. 2488. tn. 20230302. 1557. 007. html.
WU W G, BIAN L X, HE Y, et al. Design of magnetotelluric transmitter and receiver coils with the integration of transient and harmonic electromagnetic method[J/OL]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation: 1-11[2023-04-06]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/11. 2488. tn. 20230302. 1557. 007. html.

[15] CHENG J L, LI F, PENG S P, et al. Joint inversion of TEM and DC in roadway advanced detection based on particle swarm optimization [J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 123: 30-35.

[16] ZHOU G Q, YUE M X, YANG X D, et al. A metal interference correction method of tunnel transient electromagnetic advanced detection [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2020, 17(3): 429-438.

[17] 周官群, 王亚飞, 陈兴海, 等. 掘进工作面“三角锥”型直流电法超前探测正演研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3015-3023.
ZHOU G Q, WANG Y F, CHEN X H, et al. Research on forward modeling of “triangular cone” type direct current method for heading detection [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3015-3023.

[18] 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.
WANG X L, FENG H, LI P, et al. Application of COMSOL multiphysics to pilot detection positive evolution of mine resistivity [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(11):112-117.

[19] KHORCHANI H, KAMEL S. Contribution of the resistivity method to the determination of the zone and the hydro-geophysical characteristics of the aquifer system in Tataouine (southern tunisia) [J]. Journal of African Earth Sciences, 2020, 172: 103942.

[20] 袁亮, 张平松. TBM 施工岩巷掘探一体化技术研究进展与思考[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 21-32.
YUAN L, ZHANG P S. Research progress and thinking on integrated tunneling and detection technology of rock roadway with TBM [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 21-32.

[21] 程久龙, 程鹏, 李亚豪. 基于 IABC-ICA 的随掘地震去噪方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 413-422.
CHENG J L, CHENG P, LI Y H. Denoising method of

mine seismic while drilling data based on IABC-ICA[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 413-422.

[22] 王季, 覃思, 吴海, 等. 随掘地震实时超前探测系统的试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 1-7.
WANG J, QIN S, WU H, et al. Experimental study on advanced real time detection system of seismic-while-excavating[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4):1-7.

[23] 张平松, 李圣林, 邱实, 等. 巷道快速智能掘进超前探测技术与发展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2158-2173.
ZHANG P S, LI SH L, QIU SH, et al. Advance detection technology and development of fast intelligent roadway drivage[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2158-2173.

作者简介

许少毅,2010 年于中国矿业大学获得学士学位,2015 年于中国矿业大学获得博士学位,现为中国矿业大学副教授、博士生导师,主要研究方向为采掘装备智能化。
E-mail: shaoyi@ cumt. edu. cn

Xu Shaoyi received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from China University of Mining and Technology in 2010 and 2015, respectively. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at China University of Mining and Technology. His main research interest is intelligent mining equipment.

卢文庭,2019 年于安徽理工大学获得学士学位,现为中国矿业大学硕士研究生,主要研究方向为采掘装备智能化。
E-mail: TS20050035A31@ cumt. edu. cn

Lu Wenting received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2019. He is currently a master student at China University of Mining and Technology. His main research interest is intelligent mining equipment.

王承涛(通信作者),2015 年于中国矿业大学获得学士学位,2020 年于中国矿业大学获得博士学位,现为中国矿业大学讲师,主要研究方向为大数据处理与分析。
E-mail: chengtaowang@ cumt. edu. cn

Wang Chengtao (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from China University of Mining and Technology in 2015 and 2020, respectively. He is currently a lecturer at China University of Mining and Technology. His main research interests are big data processing and analysis.

林嘉睿,2012 年于天津大学获得博士学位,现为天津大学副教授、博士生导师。主要研究方向为激光及光电测试、大尺寸精密测量技术。
E-mail: linjr@ tju. edu. cn

Lin Jiarui received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2012. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at Tianjin University. His main research interests include photoelectric testing technology and large-scale precision measurement.

邢方方,2013 年于中国矿业大学获得硕士学位,现为徐州工业职业技术学院讲师,主要研究方向为机电系统智能控制。
E-mail: cumtxingfangfang@ 163. com

Xing Fangfang received her M. Sc. degree from China University of Mining and Technology in 2013. She is currently a lecturer at Xuzhou College of Industrial Technology. Her main research interest is intelligent control of electromechanical system.

李威,2004 年于中国矿业大学博士学位,现为中国矿业大学教授、博士生导师,主要研究方向为采掘装备智能化。
E-mail: liweicumt@ 163. com

Li Wei received his Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 2004. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at China University of Mining and Technology. His main research interest is intelligent mining equipment.

王禹桥,2012 年于中国矿业大学获得博士学位,现为中国矿业大学副教授,主要研究方向为地下载运系统安全监测。
E-mail: cumtwyq@ cumt. edu. cn

Wang Yuqiao received his Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 2012. He is currently an associate professor at China University of Mining and Technology. His main research interest is safety monitoring of underground delivery systems.