

矿井直流电法偶极-偶极超前探测装置模拟及其应用

岳建华¹, 滕小振¹, 习丹阳¹, 张河瑞², 吴晓康³, 鲁凯亮⁴

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中煤集团山西华昱能源有限公司, 山西 朔州 036000; 4. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221111)

摘 要:煤矿井下直流电法超前探测是探查掘进工作面前方含水构造的主要方法之一, 现场实际应用时多采用基于球壳理论发展出来的三极超前探测装置, 近些年来许多学者对该装置的探测精度与分辨率产生了质疑, 且该装置井下施工时需布置无穷远电极, 进而造成施工效率低和成本高等问题。为提高直流电法超前探测精度和现场施工效率, 提出了矿井直流电法偶极-偶极超前探测装置, 通过理论研究、数值模拟和实测数据分析相结合的方式, 对偶极-偶极装置的探测能力进行研究。首先, 建立全空间地电模型对直流偶极子源的电场分布特征进行正演模拟, 证明了该方法在直流电法超前探测中的可靠性与可行性。然后, 通过设置均匀全空间地电模型和含不同形状低阻异常体的地电模型进行数值模拟, 对比分析了单极-偶极与偶极-偶极装置的超前探测效果及对低阻异常体的响应特征。最后, 通过现场试验, 获得了掘进巷道工作面前方的电性响应特征, 采用瞬变电磁超前探测方法进行对比分析, 得到工作面前方 5~45 m 内有一处低阻异常, 经钻探验证该异常属实。结果表明: 采用矿井直流电法偶极-偶极超前探测装置可以有效地探查掘进工作面前方的低阻异常体, 且该方法探测精度和施工效率高, 节省了大量的人力和物力, 具有理论意义和实际应用价值。

关键词: 矿井直流电法; 超前探测; 偶极-偶极装置; 数值模拟; 响应特征

中图分类号: P631 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)01-0564-08

Research on simulation and application of mine dipole-dipole advance detection device by direct current method

YUE Jianhua¹, TENG Xiaozhen¹, XI Danyang¹, ZHANG Herui², WU Xiaokang³, LU Kailiang⁴

(1. School of Resource and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. China Coal Group Shanxi Huayu Energy Co., Ltd., Shuozhou 036000, China; 4. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Advanced detection using the direct current (DC) method in underground coal mines is a primary technique for identifying water-bearing structures ahead of the driving face. Traditionally, a three-pole advanced detection device, based on spherical shell theory, has been widely utilized in field applications. However, recent concerns have been raised by scholars regarding the accuracy and resolution of this device. Moreover, the necessity of using infinite electrodes in under-

收稿日期: 2024-08-07 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0943

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (42230811); 国家重点研发计划资助项目 (2023YFC3008901)

作者简介: 岳建华 (1964—), 男, 山东济宁人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: yuejh@cumt.edu.cn

通讯作者: 滕小振 (1996—), 男, 河南周口人, 博士研究生。E-mail: tengxz@cumt.edu.cn

引用格式: 岳建华, 滕小振, 习丹阳, 等. 矿井直流电法偶极-偶极超前探测装置模拟及其应用[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 564-571.

YUE Jianhua, TENG Xiaozhen, XI Danyang, et al. Research on simulation and application of mine dipole-dipole advance detection device by direct current method[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 564-571.



移动阅读

ground settings results in low construction efficiency and high costs. To address these issues, this paper proposes a dipole-dipole advanced detection device. We assess the device's detection capabilities through a combination of theoretical research, numerical simulations, and analysis of measured data. Initially, we establish a full-space geoelectric model to simulate the electric field distribution characteristics of a DC dipole source, demonstrating the method's reliability and feasibility for advanced DC detection. We then compare and analyze the detection effects and response characteristics to low-resistance anomalous bodies of both pole-dipole and dipole-dipole devices using uniform and varied full-space geoelectric models. Finally, field tests provided valuable insights into the electrical response characteristics at the front of the excavation tunnel. Using the transient electromagnetic advance detection method for comparative analysis, we identified a low-resistance anomaly located between 5 to 45 meters ahead. This anomaly was subsequently confirmed through drilling. The study concludes that the mine's dipole-dipole DC method effectively identifies low-resistance anomalies in front of the driving head. This method not only offers high detection accuracy and construction efficiency but also saves significant manpower and material resources, highlighting its theoretical significance and practical application value.

Key words: mine direct current method; advanced detection; dipole-dipole device; numerical simulation; response characteristic

0 引 言

矿井直流电法具有抗干扰能力强、理论成熟、探测效果好等优点,在过去 30 多年间被广泛应用于探测巷道顶、底板和掘进工作面前方的含导水构造^[1-2],成为《煤矿防治水细则》推荐的主要物探方法之一。煤矿井下直流电法三极超前探测装置最早由李学军^[3]提出,该方法又称为定点源梯度法或单极-偶极法,即在掘进巷道工作面布置供电电极 A,离巷道工作面较远位置布置供电无穷远电极 B,在已掘巷道内等间隔布置测量电极 MN 测量电位差,给出了超前探测资料的半定量解释方法。程久龙等^[4]研究了单极-偶极直流电阻率法超前探测装置的原理,并提出了几何作图法确定电性异常体位置。为提高解释的准确度,刘青雯^[5]在定点源梯度法的基础上提出了三点三极超前探测方法,即在掘进巷道工作面布置 3 个等间隔供电电极 A₁、A₂、A₃,在已掘巷道内等间隔测量电位差,进而突出巷道前方的地质异常。赵冠宇等^[6]和高卫富等^[7]基于 COMSOL 数值模拟软件研究了三点三极超前探测的地电响应特征和有效探测距离。为压制井下干扰提高探测精度和分辨率,韩德品等^[8]提出七点供电三极测量的超前探测装置。

然而,国内某些学者曾对直流电法三极超前探测装置的有效性提出质疑。黄俊革等^[9]通过大量的模型计算得出仅利用电阻率极值位置难以准确解释掘进工作面前方的地质异常体。强建科等^[10]通过理论计算和数值模拟研究了掘进工作面前方存在低阻异常体时只能引起视电阻率曲线的单调下降,难以判断低阻异常体的空间位置。李飞等^[11-12]针对直流点电源场进行数值模拟,得出该方法对掘进工作面前方异常

体存在弱敏感性,实际应用中难以有效识别异常体的大小和位置。张平松等^[13]认为点电源场球壳理论不适用于超前探测实测资料解释,需配合多种方法综合预报与解释。罗国平^[14]通过分析研究三极超前探测解释成果与实际不符的案例,提出需在接地电阻及数据采集方式等方面加强研究。王鹏等^[15]针对上述质疑,通过数值模拟得到了异常距离与异常特征参数极小值之间的关系式,证明了该方法的基本原理是正确的。王敏等^[16]基于 ANSYS 有限元软件,模拟分析了巷道对三极装置探测效果的影响,认为该装置对巷道工作面前方的低阻体反映不明显,难以圈定异常体位置。阮百尧等^[17]和张力等^[18]认为单极-偶极装置存在探测距离有限,易受巷道条件等因素影响,提出了坑道直流电阻率超前聚焦探测新方法,通过数值模拟验证了该方法可有效探测坑道掘进前方不良地质体的存在。李术才等^[19]针对三极观测装置易受到测线附近旁侧异常干扰等因素影响,提出了一种基于多同性源阵列电阻率的超前探测新方法,经数值模拟与物理模型试验验证该方法能较好地反演出含水构造位置。高卫富等^[20]建立巷道超前探测三维地电模型,通过正演模拟对比分析了二极、三极装置和四极装置对不同距离低阻体的响应特征,进而得到三极装置对异常体的响应程度较低,四极装置对异常的响应更为明显且能够准确识别出异常体的横向位置。

基于施工方便、偶极装置分辨能力最强的考虑,为提高超前探测精度和井下数据采集的施工效率,笔者提出了矿井直流电法偶极-偶极超前探测装置,该装置将三极装置中的供电电极 A 与无穷远供电电极 B 均置于掘进巷道工作面附近,测量电极 MN 等间隔置于供电电极 AB 后方采集数据。通过数值模拟对比

研究了不同装置之间的探测效果,确定了该方法的可靠性,并开展现场试验,与矿井瞬变电磁法探测结果对比分析,确定了低阻异常位置,经钻探验证偶极-偶极装置的探测结果准确。

1 方法原理

1.1 偶极-偶极直流电法超前探测方法

矿井直流电法偶极-偶极超前探测装置井下施工布置如图 1a 所示,供电电极 A、B 均置于巷道工作面附近,供电电极距为 a ,两电极同时供电形成稳定人工电流场,在巷道工作面后方距供电电极 na 位置布置测量电极 M、N,每次供电测量电极距以等间隔 a 向后移动。

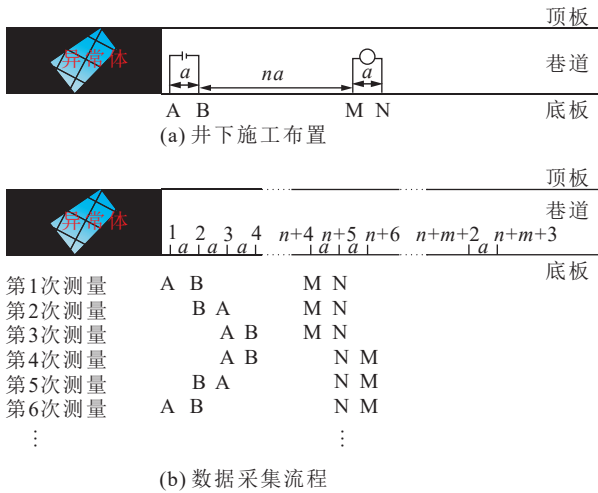


图1 偶极-偶极超前探测装置施工示意图

Fig.1 Construction diagram of dipole-dipole advance detection device

为提高探测精度与分辨率,井下数据采集时在巷道工作面附近等间隔布置4个供电电极,编号分别为1、2、3、4,间隔 na 距离后布置 m 个电极作为测量电极,编号分别为 $n+4, n+5, \dots, n+m+3$,如图 1b 所示。数据采集时分别选取第1、2号电极作为供电电极 A 和 B,选取第 $n+4, n+5$ 号电极作为测量电极 M、N。基于电极互换原理,第一次测量完成后,移动供电电极 A 至第3号电极位置,其他电极位置保持不变重复测量,以此类推每次测量仅移动1个电极,极大地节省了人力物力,提高了施工效率与探测精度。

为保证井下数据采集的可靠性,数据采集时采用比较读数法记录数据,即每次测量保持供电电压不变的情况下,连续观测三次测量偶极 MN 间的电位差,分别记为 $V_{MN}^{(i)} (i=1, 2, 3)$,按式 (1) 和式 (2) 计算3次观测电位差的偏差值。

$$\bar{V} = (V_{MN}^{(1)} + V_{MN}^{(2)} + V_{MN}^{(3)})/3 \quad (1)$$

$$\delta_i = \frac{|\Delta V_{MN}^{(i)}|}{\bar{V}} = \frac{|V_{MN}^{(i)} - \bar{V}|}{\bar{V}} \times 100\%, i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

如果 $\delta_i \leq 3\% \sim 5\%, i = 1, 2, 3$, 则将3次测量电位差的平均值 \bar{V} 作为测量偶极 MN 的电位差,否则重复观测,直到符合要求为止。

数据处理时首先根据测量电位差的平均值 \bar{V} 、供电电流 I 和装置系数 K 计算视电阻率 $\rho_s^{[21]}$ 。

$$\rho_s = K \frac{\bar{V}}{I} \quad (3)$$

其中,偶极-偶极超前探测装置系数 K 的计算式为

$$K = \pi(n+1)a[(n+1)^2 - 1] \quad (4)$$

1.2 数值模拟理论

直流电法超前探测现场施工时如图 1 所示,在掘进工作面后方布置一条测线进行数据采集,因此本文数值模拟选用 2D 地电模型,由于点电源为 3D 电场,目前常采用 2.5D 电阻率数值模拟方法对地电模型进行离散化来解决实际问题。将 3D 偏微分控制方程傅里叶变换为 2D 方程,以减少计算时间。通过在傅里叶变换域中求解二维偏微分方程来获得正向解:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) - k^2 \sigma V = -I \delta(x) \delta(z) \quad (5)$$

式中: V 为傅里叶变换域中的标量电势, V ; I 为电流源, A, 数值模拟时供电电流 $I=1$ A; k 为变换域中的波数; σ 为电导率, S/m。

对于非线性的反演问题,数据向量 \mathbf{d} 是模型参数向量 \mathbf{m} 的非线性函数,最小二乘法反演的目标函数为:

$$S(\mathbf{m}) = (\mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{g}(\mathbf{m}))^T \mathbf{W}_d (\mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{g}(\mathbf{m})) \quad (6)$$

式中: \mathbf{d}_{obs} 为观测数据, $\mathbf{g}(\mathbf{m})$ 为计算数据, \mathbf{W}_d 为数据加权矩阵。

非线性反演问题采用迭代法求解,在每次迭代中,通过求解以下线性化方程得到模型更新向量 $\Delta \mathbf{m}$:

$$\left(\mathbf{J}^T \mathbf{W}_d \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I} \right) \Delta \mathbf{m} = \mathbf{J}^T \mathbf{W}_d (\mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{g}(\mathbf{m})) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}}$ 为雅可比矩阵; λ 为阻尼因子; \mathbf{I} 为单位矩阵。

1.3 直流偶极子源全空间电场分布特征

为研究直流偶极子源的全空间电场分布特征,设置 2D 地电模型进行数值模拟。在全空间中设置一对电流为 1 A 的点电源,点电源位置分别为 (0, 0) 与 (-4, 0),红色虚线为巷道掘进工作面位置,工作面前方 10~30 m 处设置 1 个 20 m×20 m 的块状低阻异常体,

阻值为 $10 \Omega \cdot \text{m}$, 围岩电阻率为 $200 \Omega \cdot \text{m}$ 。基于有限元数值模拟所得电场分布如图2所示。图中黑色虚线为均匀介质全空间条件下的电位等值线, 实线及色标变化为工作面前方有低阻异常体情况下的电位等值线图。对比分析可知: 低阻异常体位置的电位等值线明显发生畸变, 且均匀介质与含低阻异常体的电位等值线存在明显的偏离, 说明前方异常体对后方的电场分布会产生影响。

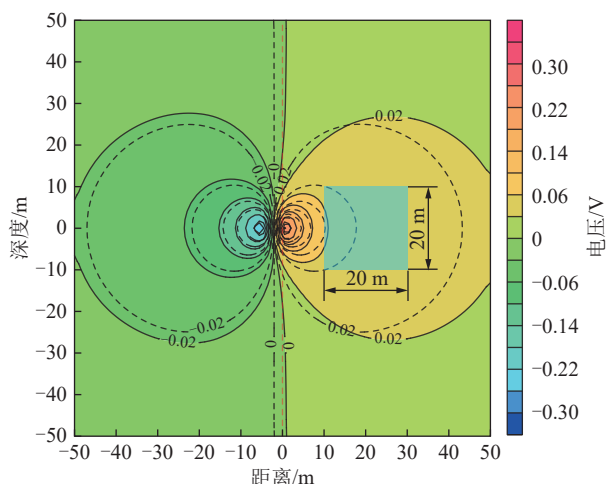


图2 全空间偶极子源电位等值线分布

Fig.2 Full-space dipole source electric field distribution

2 数值模拟

2.1 全空间均匀介质不同装置数值模拟

为对比传统单极-偶极超前探测装置和偶极-偶极超前探测装置的探测效果, 由图2可知供电电流为

1 A 时偶极子源全空间纵向影响范围在 30 m 左右, 考虑到电场在纵向上的衰减范围, 设置全空间均匀介质地电模型如图3所示, 0 为掘进工作面位置, 测线布置在掘进工作面左侧 0~100 m, 纵向 $y=-50 \text{ m}$ 位置, 红色圆圈为供电电极, 黑色三角形为测量电极, 背景值为 $200 \Omega \cdot \text{m}$ 。

图4为数值模拟得到的超前探测视电阻率断面图, 其中左侧为视电阻率断面图, 右侧为掘进工作面前方的均匀介质地电模型。数值模拟结果均与实际地电模型较为接近且误差在 3% 以内, 验证了数值模拟算法的可靠性。

为进一步研究上述超前探测装置对掘进工作面前方低阻异常的探测效果, 分别设置块状低阻异常和板状低阻异常进行数值模拟。

2.2 块状低阻异常体不同探测装置数值模拟

为研究不同探测装置对巷道工作面前方块状低阻异常体的探测效果, 设置地电模型如图5所示, 距巷道工作面前方 30 m 位置设置 1 个边长 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的低阻异常体, 阻值为 $10 \Omega \cdot \text{m}$, 背景值为 $200 \Omega \cdot \text{m}$, 测线位置及探测装置布置如图3所示。图6为数值模拟得到的超前探测视电阻率断面图, 其中每个子图左侧为视电阻率断面图, 右侧为掘进工作面前方含块状低阻异常体的地电模型, 黑色虚线为测线位置, 黑色虚线框为低阻异常体在测线上的镜像位置。对比分析可得: 图6a 单点单极-偶极和图6c 两点偶极-偶极超前探测装置对巷道工作面前方的低阻异常无明显反映; 图6b 三点单极-偶极超前探测装置在镜像位

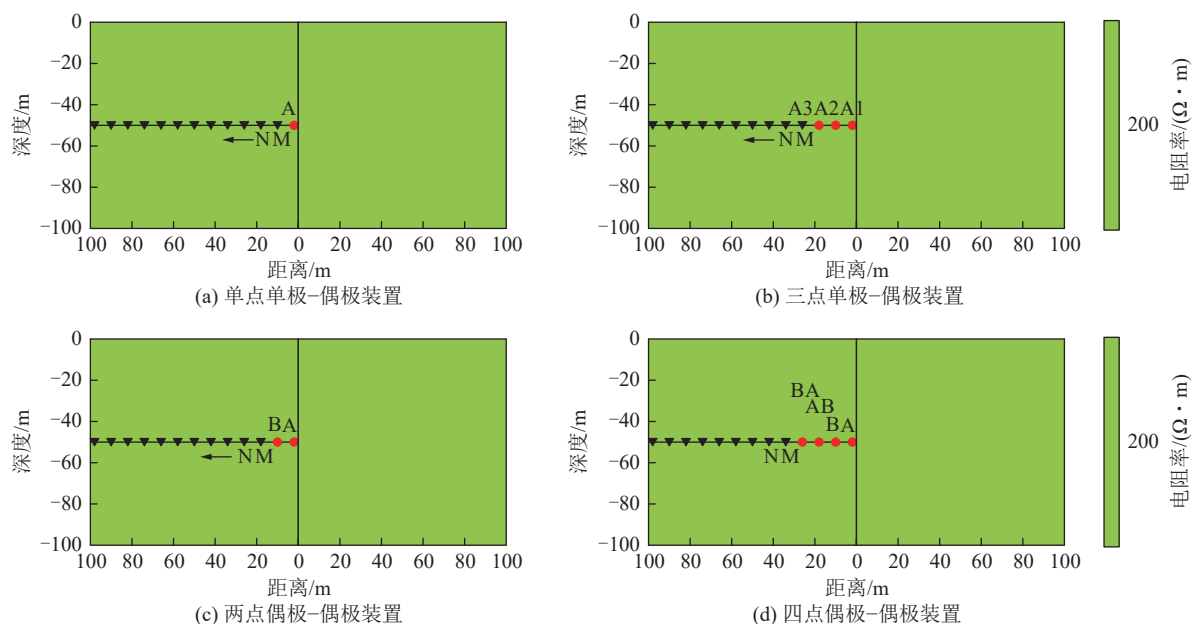


图3 均匀介质不同探测装置地电模型

Fig.3 Goelectric models of different detection devices in uniform media

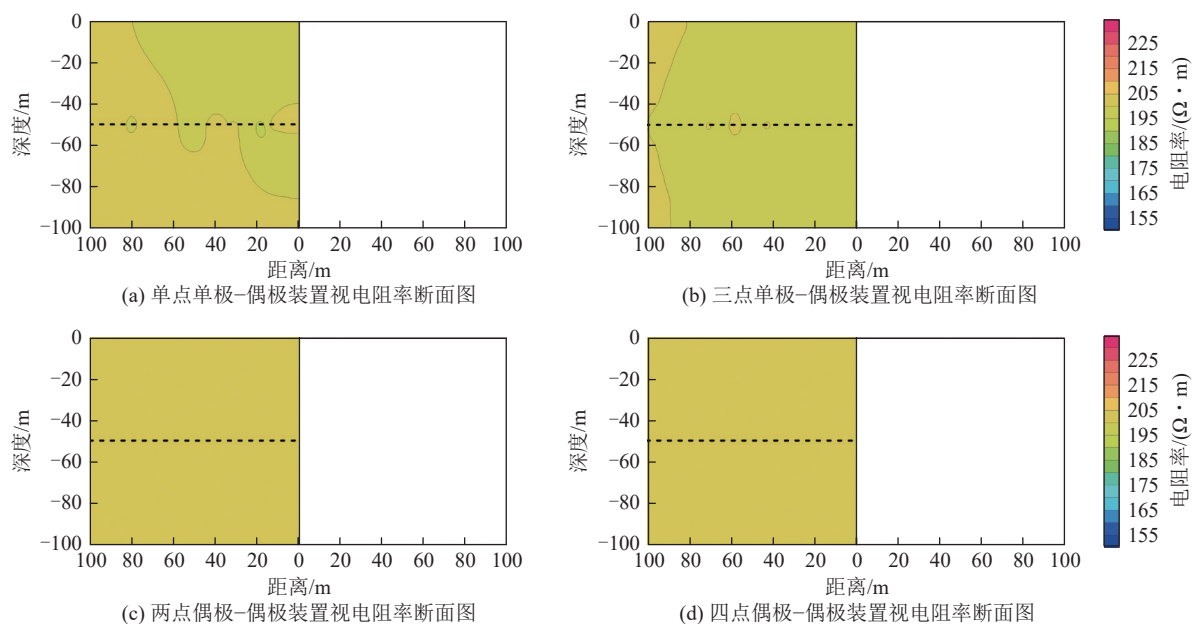


图4 均匀介质不同探测装置超前探测视电阻率断面图

Fig.4 Profile of apparent resistivity of advanced detection with different detection devices in uniform media

置虽然有低阻异常反映,但断面图中假异常分布较多,

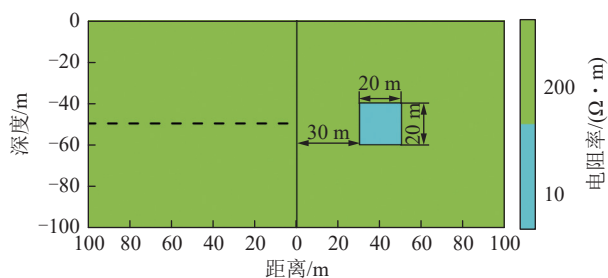


图5 块状异常体地电模型

Fig.5 Geoelectric model of massive anomaly

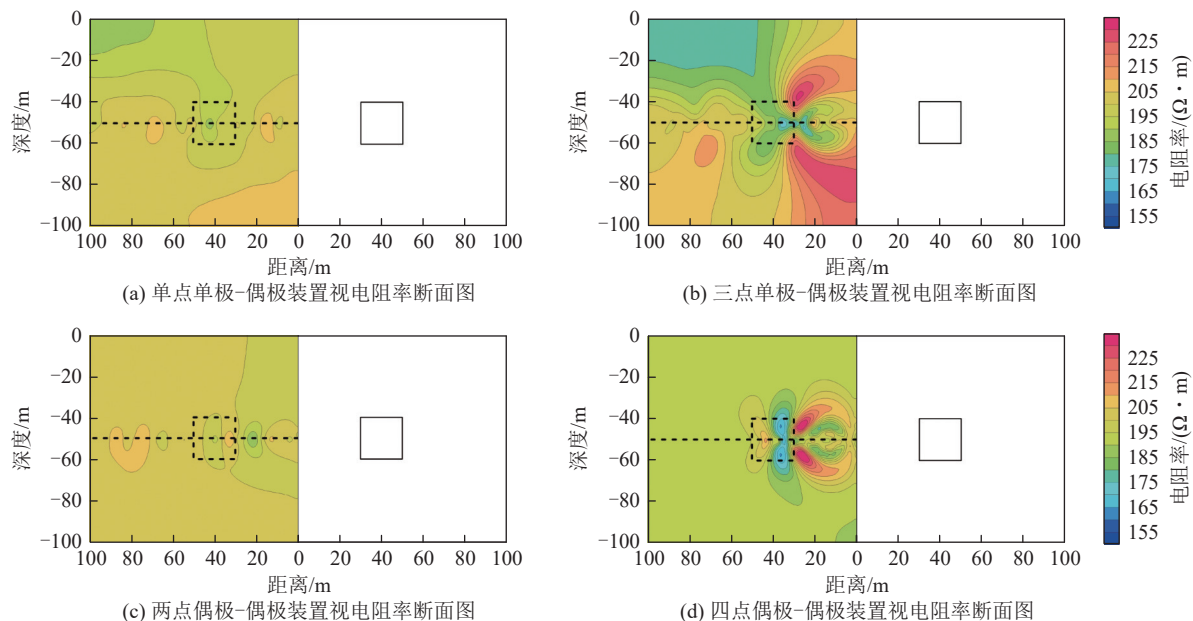


图6 块状异常体不同探测装置超前探测视电阻率断面图

Fig.6 Cross sections of apparent resistivity of different detection devices in advance detection of block anomalies

与地电模型差异较大,难以识别工作面前方的低阻异常;图6d四点偶极-偶极超前探测装置在镜像位置有明显的低阻异常反映。由此可知,四点偶极-偶极超前探测装置对掘进巷道工作面前方低阻异常的识别能力较高。

2.3 板状异常体不同探测装置数值模拟

为进一步研究不同探测装置对巷道工作面前方板状低阻异常体的探测效果,设置地电模型如图7所示,距巷道工作面前方30m位置设置1个边长10m×90m的板状低阻异常体,阻值为10Ω·m,背景值为

200 $\Omega \cdot m$, 测线位置及探测装置布置如图3所示。图8为数值模拟得到的超前探测视电阻率断面图, 其中每个子图左侧为视电阻率断面图, 右侧为掘进工作面前方含板状低阻异常体的地电模型, 黑色虚线为测线位置, 黑色虚线框为低阻异常体在测线上的镜像位置。对比分析可得: 图8a单点单极-偶极和图8c两点偶极-偶极装置对巷道工作面前方的低阻异常反映较弱; 图8b三点单极-偶极装置超前探测视电阻率断面图低阻异常的镜像位置仅在测线位置有较弱反映, 且探测区域内假异常较多, 与地电模型差异较大, 难以识别前方的低阻异常位置; 图8d四点偶极-偶极在镜像位置有明显的低阻异常反映, 低阻异常位置与实

际地电模型较为接近。由此进一步验证了四点偶极-偶极超前探测装置对掘进巷道工作面前方的低阻异常探测效果较好。

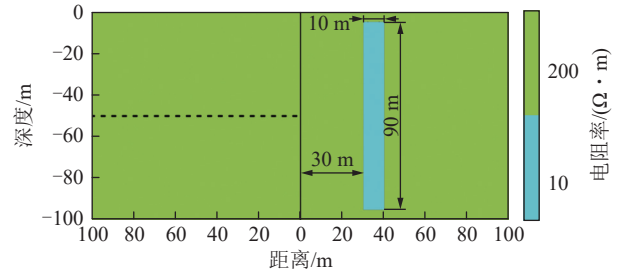


图7 板状异常体地电模型

Fig.7 Geoelectric model of plate anomalous body

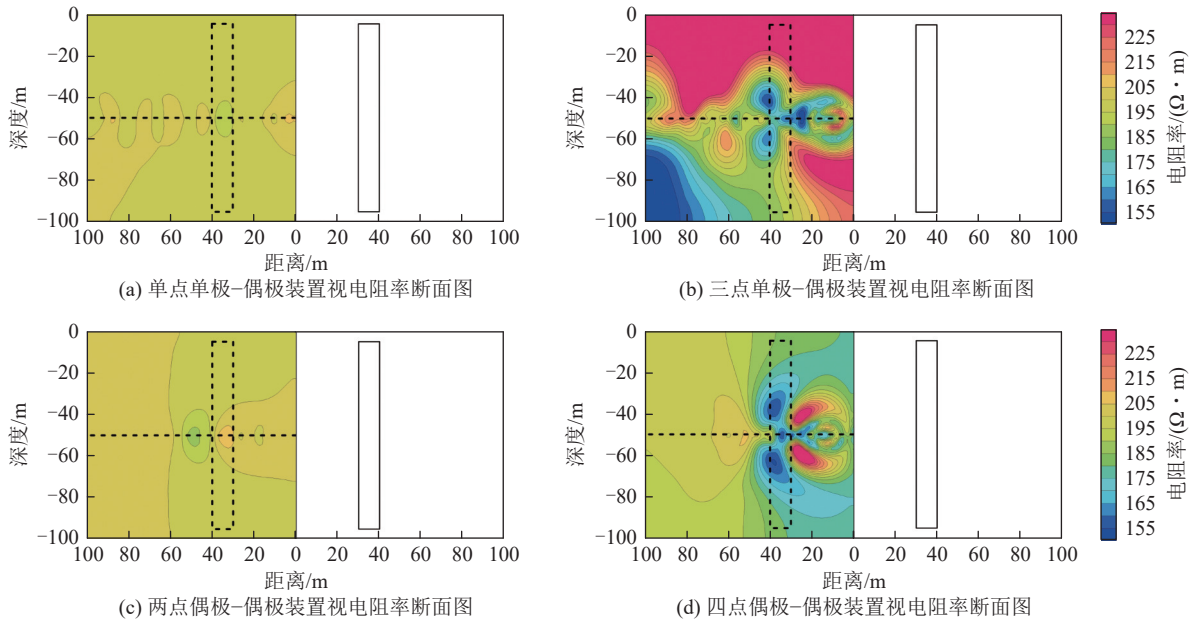


图8 板状异常体不同探测装置超前探测视电阻率断面图

Fig.8 Profile of apparent resistivity of different detection devices in advance detection of plate anomalies

3 煤矿井下偶极-偶极直流电法超前探测试验

为验证偶极-偶极超前探测装置在实际工程中的应用效果, 在煤矿井下进行试验验证。山西某矿4号煤层为带压开采且顶板砂岩裂缝水较多, 其中64104运输巷掘进过程中多次出现淋水现象, 为保障巷道的安全掘进, 查清工作面前方隐伏含导水构造引起的低阻异常, 特选用直流电法偶极-偶极超前探测装置进行探测。

现场试验选用四点偶极-偶极探测装置, 电极距 $a=4m$, 数据采集流程如图1所示, 为方便区分供电电极A、B, 现将4个供电电极分别编号为A1、A2、A3、A4, 其中A1靠近巷道工作面位置。首先对井下采集的原始数据进行处理, 处理过程如1.1节所述, 对计算所得的视电阻率进行归一化处理, 结果如图9所示。

从归一化视电阻率曲线图中可以看出绿色虚线框位

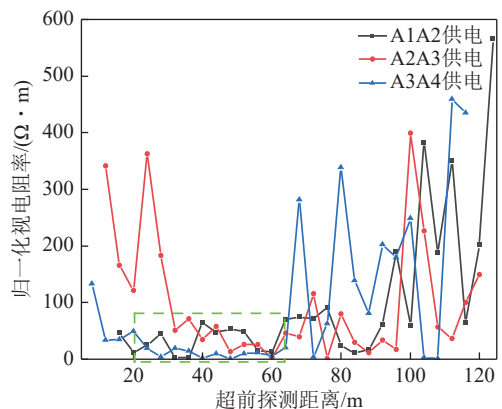


图9 井下实测数据归一化视电阻率曲线图

Fig.9 Normalized apparent resistivity curves of underground measured data

置在 3 次分别供电测量时均表现为低阻异常。将 3 次测量计算得到的视电阻率值进行反演并绘制视电阻率断面图,图中蓝色虚线为测线位置,如图 10 所示,巷道掘进工作面前方 5~45 m 位置出现明显的低阻异常。

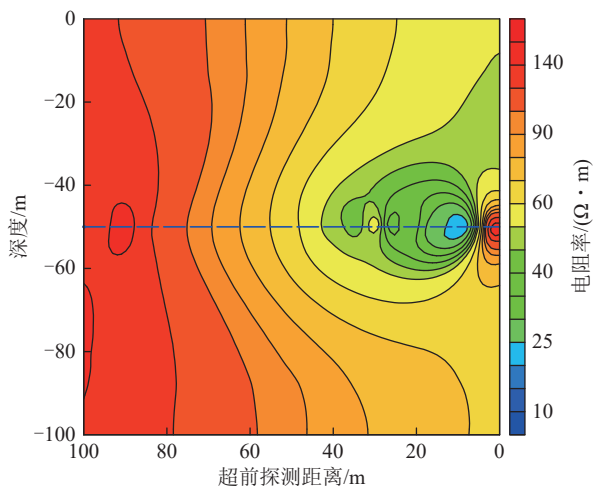


图 10 井下实测数据反演视电阻率断面图

Fig.10 Apparent resistivity cross section diagram obtained by inversion of underground measured data

为对比分析偶极-偶极超前探测装置探测结果的可靠性,在现场同时采用瞬变电磁超前探测方法进行探测。从图 11 瞬变电磁探测结果可以看出巷道掘进右前方 60 m 范围内存在一处低阻异常,该异常与直流电法超前探测结果基本吻合。后经矿方钻探验证,异常位置打钻出水,结合现场情况及地质资料分析,该异常为 SDF6 断层影响砂岩裂隙发育且含水的反映,涌水量为 5~10 m³/h。

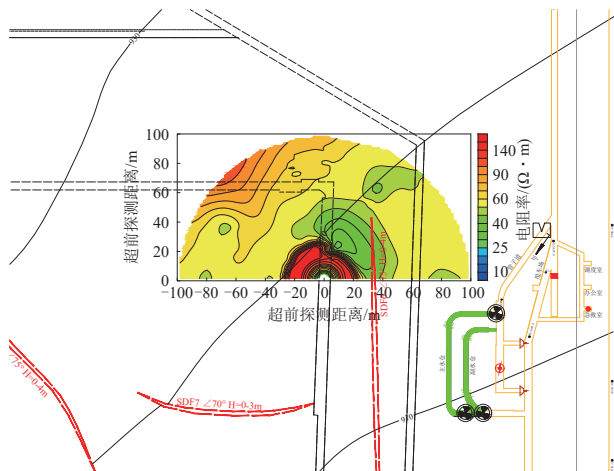


图 11 矿井瞬变电磁法超前探测视电阻率断面图

Fig.11 Apparent resistivity profile of mine advance detection by transient electromagnetic method

综上所述,矿井直流电法偶极-偶极超前探测装置在实际应用中探测效果较好,对 SDF6 断层影响的

掘进巷道工作面前方低阻异常响应特征明显,但井下施工环境复杂,数据采集过程中影响因素较多,为提高超前探测结果的可靠性,建议采用多种物探方法进行对比验证。

4 结 论

1) 提出了一种矿井直流电法偶极-偶极超前探测方法,通过数值模拟研究了该方法的可行性,然后建立不同的地电模型和单极-偶极超前探测装置的探测效果进行了对比分析,结果表明偶极-偶极超前探测方法对前方低阻异常体的探测效果较好,并且在井下应用时减少了无穷远供电电极的布置,提高了施工效率,节省了人力和物力。

2) 在煤矿井下开展偶极-偶极超前探测装置现场试验,并将试验结果与矿井瞬变电磁法结果进行对比,发现一处低阻异常区,该异常经钻探验证属实,进而证明了该方法具有很强的实用性和推广性。

3) 矿井直流电法偶极-偶极超前探测方法在掘进巷道超前探测中探测效果较好,但本文对极距、供电电极数量及该方法的有效探测距离等方面的研究较少。因此,下一步将讨论该方法的装置参数及前方低阻异常体的有效探测距离。

参考文献(References):

- [1] 岳建华,薛国强.中国煤炭电法勘探 36 年发展回顾[J].地球物理学进展,2016,31(4): 1716-1724.
YUE Jianhua, XUE Guoqiang. Review on the development of Chinese coal electric and electromagnetic prospecting during past 36 years[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(4): 1716-1724.
- [2] 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 Jianhua, YANG Haiyan, RAN Huageng. Research status and development trend of mine electrical prospecting[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 259-276.
- [3] 李学军.煤矿井下定点源梯度法超前探测试验研究[J].煤田地质与勘探,1992,20(4): 59-63.
LI Xuejun. Study and experiment on heading detecting by fixed electric source gradient method in underground[J]. Coal Geology & Exploration, 1992, 20(4): 59-63.
- [4] 程久龙,王玉和,于师建,等.巷道掘进中电阻率法超前探测原理与应用[J].煤田地质与勘探,2000,28(4): 60-62.
CHENG Jiulong, WANG Yuhe, YU Shijian, et al. The principle and application of advance surveying in roadway excavation by resistivity method[J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(4): 60-62.
- [5] 刘青雯.井下电法超前探测方法及其应用[J].煤田地质与勘探,2001,29(5): 60-62.
LIU Qingwen. Underground electrical lead survey method and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(5): 60-62.

- [6] 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.
ZHAO Guanyu, WANG Jing, ZHAI Peihe, et al. Research on mine direct current method advanced detection based on COMSOL multiphysics numerical simulation[J]. Coal Technology, 2018, 37(8): 177-179.
- [7] 高卫富, 王克未, 胡安顺, 等. 基于 COMSOL 的三点源供电直流电法超前探测技术[J]. 煤矿安全, 2023, 54(8): 168-172.
GAO Weifu, WANG Kewei, HU Anshun, et al. Advance detection technology of three-point source DC method based on COMSOL[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(8): 168-172.
- [8] 韩德品, 李丹, 程久龙, 等. 超前探测灾害性含导水地质构造的直流电法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 635-639.
HAN Depin, LI Dan, CHENG Jiulong, et al. DC method of advanced detecting disastrous water-conducting or water-bearing geological structures along same layer[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 635-639.
- [9] 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.
HUANG Junge, WANG Jialin, RUAN Baiyao. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1529-1538.
- [10] 强建科, 阮百尧, 周俊杰, 等. 煤矿巷道直流三极法超前探测的可行性[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(1): 320-326.
QIANG Jianke, RUAN Baiyao, ZHOU Junjie, et al. The feasibility of advanced detection using DC three-electrode method in coal-mine tunnel[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(1): 320-326.
- [11] 李飞, 张永超, 连会青, 等. 掘进工作面直流电法超前探测技术问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 250-256.
LI Fei, ZHANG Yongchao, LIAN Huiqing, et al. Discussion on problems of direct current advance detection method in roadway driving face[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 250-256.
- [12] 李飞, 程久龙, 谭强, 等. 巷道掘进中电阻率法超前探测研究[J]. 煤矿安全, 2012, 43(7): 30-34.
LI Fei, CHENG Jiulong, TAN Qiang, et al. Study on advanced detection by resistivity method in roadway excavation[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(7): 30-34.
- [13] 张平松, 李永盛, 胡雄武. 巷道掘进直流电阻率法超前探测技术应用探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 135-140.
ZHANG Pingsong, LI Yongsheng, HU Xiongwu. Application and discussion of the advanced detection technology with DC resistivity method in tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 135-140.
- [14] 罗国平. 直流电阻率三极超前探测的有效性[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(3): 72-75.
LUO Guoping. Effectiveness of DC resistivity trielectrode advanced prospecting[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(3): 72-75.
- [15] 王鹏, 鲁晶津, 王信文. 再论巷道直流电法超前探测技术的有效性[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 257-263.
WANG Peng, LU Jingjin, WANG Xinwen. Restudy on effectivity of direct current advance detection method in roadway[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 257-263.
- [16] 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 Min, LIU Yu, MU Yi, 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.
- [17] 阮百尧, 邓小康, 刘海飞, 等. 坑道直流电阻率超前聚焦探测新方法研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 289-296.
RUAN Baiyao, DENG Xiaokang, LIU Haifei, et al. Research on a new method of advanced focus detection with DC resistivity in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(1): 289-296.
- [18] 张力, 阮百尧, 刘海飞, 等. 三维全空间坑道直流聚焦超前探测数值模拟[J]. 物探与化探, 2011, 35(3): 419-422.
ZHANG Li, RUAN Baiyao, LIU Haifei, et al. 3d numerical modeling of advanced exploration in tunnel based on the DC focus resistivity method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(3): 419-422.
- [19] 李术才, 聂利超, 刘斌, 等. 多同性源阵列电阻率法隧道超前探测方法与物理模拟试验研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(4): 1434-1446.
LI Shucai, NIE Lichao, LIU Bin, et al. Advanced detection and physical model test based on multi-electrode sources array resistivity method in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(4): 1434-1446.
- [20] 高卫富, 王立栋, 訾建潇, 等. 掘进巷道直流电法四极装置超前探测的模拟及应用研究[J]. 地球物理学进展, 2024, 39(1): 412-420.
GAO Weifu, WANG Lidong, ZI Jianxiao, et al. Simulation and application research on the advanced detection by the dipole-dipole device of the DC method in the excavation roadway[J]. Progress in Geophysics, 2024, 39(1): 412-420.
- [21] 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.