



地球物理学进展
Progress in Geophysics
ISSN 1004-2903, CN 11-2982/P

《地球物理学进展》网络首发论文

题目：掘进巷道直流电法四极装置超前探测的模拟及应用研究
作者：高卫富，王立栋，訾建潇，韩滕滕，郭玉成，王乃军
收稿日期：2023-05-15
网络首发日期：2023-08-02
引用格式：高卫富，王立栋，訾建潇，韩滕滕，郭玉成，王乃军. 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/OL]. 地球物理学进展.
<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.2982.P.20230801.1702.044.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

掘进巷道直流电法四极装置超前探测的模拟及应用研究

高卫富¹, 王立栋², 訾建潇³, 韩滕滕³, 郭玉成⁴, 王乃军⁵✉

1. 山东科技大学能源与矿业工程学院, 青岛 266000;

2. 山东科技大学资源学院, 泰安 271000;

3. 鲁西矿业集团梁宝寺能源有限责任公司, 济宁 272100;

4. 鲁西矿业集团单县能源有限责任公司, 菏泽 274300;

5. 山东科技大学图书馆, 泰安 271000;

*通信作者 王乃军(1980-), 男, 博士, 主要研究方向: 地质工程, E-mail: 30765876@qq.com。

摘要 为研究矿井直流电法四极装置在掘进巷道超前探测中的效果, 本文以矿井直流电法超前探测原理为基础, 通过分析 COMSOL Multiphysics 点电源正演模型模拟值与理论值的误差, 验证了 COMSOL Multiphysics 研究直流电法超前探测的可靠性与可行性; 建立巷道超前探测三维地电模型, 通过正演模拟, 分析了巷道空腔对数据的影响, 对比了二极、三极装置与四极装置的探测效果及对不同距离低阻体的响应特征; 基于相似性原理构建物理模拟实验, 绘制了超前探测视电阻率等值线图, 研究了四极装置对迎头前方不同形状、距离异常体的实际探测效果。研究结果表明: 直流电法四极装置能够对迎头前方低阻体产生异常响应, 探测数据剔除巷道空腔影响后, 能够精准识别出异常体的横向位置; 并且相较于板状异常体, 四极装置对球状异常体的超前探测效果更好。通过将直流电法四极装置超前探测应用于工程实例中, 经钻探验证与探测效果一致, 说明该技术具有很强的实用性和推广性。

关键词 巷道超前勘探; 直流电法四极装置; 正演模拟; 物理模拟; 异常响应

中图分类号 中图法分类号: P631

文献标志码 A

Simulation and application research on the advanced detection by the dipole-dipole device of the DC method in the excavation roadway

GAO Wei-fu¹, WANG Li-dong², ZI Jian-xiao³, HAN Teng-teng³, GUO Yu-cheng⁴, WANG Nai-jun⁵ ✉

1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266000, China;

2. College of Natural Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271000, China;

3. Luxi Mining Group Liangbaosi Energy Co., Ltd., Jining 272100, China;

4. Luxi Mining Group Shanxian Energy Co., Ltd., Heze 274300, China;

5. Library of Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271000, China

Abstract In order to study the effect of mine DC method dipole-dipole device in advanced detection of excavation roadway. In this paper, based on the principle of mine DC method advanced detection, verifies the reliability and feasibility of COMSOL Multiphysics research on DC method advanced detection by analyzing the error between the simulated value and the theoretical value of COMSOL Multiphysics point power forward model. Establish a three-dimensional geoelectric model of roadway advanced detection, through forward modeling, analyze the impact of roadway cavities on data, and compare the detection effects of pole-pole, pole-dipole and dipole-dipole devices, as well as their response characteristics to low resistivity bodies at different distances. Based on the principle of similarity, the physical simulation experiment is constructed, the contour map of the apparent resistivity of the advanced detection is drawn, and the actual detection effect of the dipole-dipole device on the different shape and distance anomaly body is studied. The research results show that the dipole-dipole device can have abnormal response to the low-resistance body, and the detection data can accurately identify the horizontal position

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(41807283); 泰安市科技创新发展项目(2022GX080); 山东科技大学人才引进科研启动基金(2014RCJJ036)

作者简介: 高卫富(1983-), 男, 博士, 研究生导师, 主要研究方向: 矿井物探及防治水, E-mail: gaoweifu-2006@163.com。

网络首发时间: 2023-08-02 09:31:44 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.2982.P.20230801.1702.044.html>

lateral position of the abnormal body after eliminating the influence of the tunnel cavity; In addition, the dipole-dipole device has better advanced detection effect on spherical anomaly body than plate anomaly body; Through the application of the dipole-dipole device to the advanced detection in the engineering example, the drilling verification is consistent with the detection effect, which shows that the technology has strong practicability and popularization.

Key words advanced detection of roadway; DC dipole-dipole device; forward modeling; physical simulation; abnormal response

0 引言

现如今,随着人们对煤炭资源的开采深度不断增加,所面临地质条件变得越来越复杂,导致巷道在掘进时也将面对困难也越来越多(岳建华等, 2016; 韩德品等, 2009)。

直流电法因其抗干扰能力强(董耀等, 2022)、理论成熟(高卫富等, 2021)、探测效果好(底青云等, 2001)等优势被广泛利用在矿井水探测中(施龙青等, 2009; 2013); 近年来矿井直流电法也被用在巷道迎头前方异常体的探测中(强建科等, 2011; 董健等, 2012; 韩德品等, 2019), 目前施工现场大都采用单极-偶极装置, 该方法属于单点电源(冯玉静等, 1998)供电, 程久龙等(2000, 2014)展开双点电源供电的研究, 王小龙等(2011)运用数值模拟软件对二极装置、三极装置进行正演模拟效果研究, 提出了巷道空腔(刘斌等, 2012; 马炳镇等, 2013; 翟培合等, 2021)会对超前探测造成偏差和误差的观点, 并且得出三极装置的超前探测效果最好, 王敏等(2021)基于 ANSYS 软件对比分析了二极、三极两种装置的超前探测效果, 认为二极“U”型装置探测对异常体的响应较好。

在现场施工中, 采用直流电法二极、三极装置进行超前探测数据采集工作, 但需要布设无穷远电极, 需要消耗巨大的人力和物力, 工作量巨大, 施工效率低; 而四极装置则为两点供电, 所产生的电场更稳定, 将四极装置应用到超前探测中, 不需要再布设无穷远电极, 不仅可以节省大量的人力物力, 使得工作效率大幅提升。本文以点电源原理作为理论基础, 通过数值模拟(强建科, 2007; 王小龙, 2011; 张军等, 2012; 张淼淼, 2022)和物理模拟(解海军等, 2021)研究直流电法四极装置在超前探测中对迎头前低阻体的响应, 并结合现场工程实例应用, 说明该技术具有很强的实用性, 可以推广应用。

1 超前探测基本理论

矿井直流电法是利用一个或多个电极向大地通电, 使地下形成稳定电流场, 再通过一个或多个测量电极测得地质体的电压值和电流值, 进而得到所研究地层的视电阻率值。直流电法超前探测是以点电源原理作为理论基础, 当点电源形成稳定的电流场后, 通过测量电极的移动测量, 得到所形成的电流场的分布变化特征, 再结合地质信息资料推测出前方未采区的构造情况。

以直流电法三极 AMN 装置为例, A、B 两个供电电极向地下供电, 供电电极 A 放置于掘进迎头附近, 供电电极 B 放置于无穷远处, 使之形成以供电极 A 为点电源的稳定人工地电场。在均一介质内, 以 A 点为圆心的球形点场内, 球体内距离圆心相等位置的电位均相等, 当迎头前面存在异常时, 巷道所布置测量电极 M、N 所测量的视电阻率值与迎头前方未开挖处的 M'、N' 的视电阻率具有相似的变化趋势, 如图 1 所示。通过观测迎头后方的视电阻率异常响应来分析出前方未开挖处的视电阻率异常变化, 达到超前勘探的目的。二极装置与三极装置基本一致, 将 B、N 两电极置于无穷远处, 仅通过测量电极 M 反应未采区域电位信息。

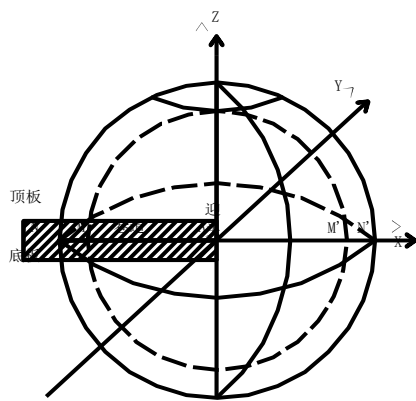


图 1 超前勘探原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of advanced detection principle

对于四极装置，供电电极 B 不再放置于无穷远处，两个供电电极同时供电，形成稳定人工电流场，测量结果是两个供电电极的叠加，测量结果更为可靠。借鉴单一供电电极超前探测理论，运用数值模拟软件建立正演模型，研究四极装置超前探的探测效果。

2 COMSOL Multiphysics 模拟

COMSOL Multiphysics 软件是一款以有限元法为基础的高级数值仿真软件，可实现多个物理场耦合问题的求解，即求解偏微分方程组来计算多物理场问题；其软件内部含有大量预定义的物理应用模式，用户可根据研究内容选择合适的模块建立模型。并且材料属性、场源项及边界条件的定义都可设置常数、任意变量的函数、逻辑表达式或者直接是一个代表实测数据的插值函数等。

运用 COMSOL Multiphysics 软件电流模块研究直流电法三维地电场正演问题的基本步骤分为前处理、计算和后处理三部分，正演模拟流程如图 2 所示。

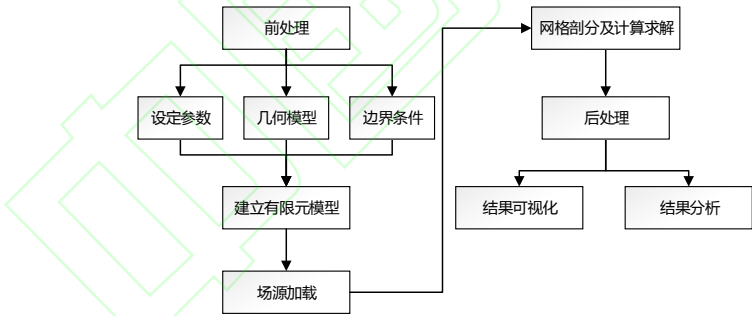


图 2 COMSOL Multiphysics 数值模拟流程图
Fig.2 Flow chart of COMSOL Multiphysics numerical simulation

为验证 COMSOL Multiphysics 软件对三维地电模型正演模拟的可靠性，以点电荷理论为理论基础，建立一个边长 200 m 的立方体模型，设立方体中心为原点，坐标 (0, 0, 0)，在该位置上设置一个电流为 10 A 点电流源，立方体内部电阻率值设置为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ ，选取立方体内，距原点位置 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、10 m、15 m、20 m、30 m、40 m、50 m 的 11 个位置作为测量点。

表1 点电流源模型电位误差分析表
Table 1 Potential error Analysis of point current source model

距离/m	模拟值/V	理论值/V	绝对误差/V	相对误差
1.0	79.5775	79.1420	0.435472	0.547%
2.0	39.7887	39.5690	0.219736	0.552%
3.0	26.5258	26.3890	0.136824	0.516%
4.0	19.8944	19.7860	0.108368	0.545%
5.0	15.9155	15.8630	0.052494	0.330%
10.0	7.9577	7.9708	0.013053	0.164%
15.0	5.3052	5.3000	0.005165	0.097%
20.0	3.9789	3.9782	0.000674	0.017%
30.0	2.6526	2.6522	0.000382	0.014%
40.0	1.9894	1.9893	0.000137	0.007%
50.0	1.5915	1.5914	0.000149	0.009%

所得 11 个测量点的电势值, 与理论值对比结果如表 1 所示, 由所得的结果分析可看出, 相对误差最大为 0.552%, 并且测点距点电流源位置越远, 误差会变得越来越小。研究结果表明: COMSOL Multiphysics 数值模拟软件对三维地电模型的正演模拟结果是可靠的, 计算误差也在合理范围之内。

3 超前探测正演模拟

3.1 模型构建

模型一: 围岩尺寸为边长 1 000 m 的立方体, 居中于点 (0, 0, 0) 处, 电阻率值设为 $\rho_1=500 \Omega \cdot \text{m}$, 将最外层设置为无限元域, 层厚为 5m; 巷道尺寸为 $100 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, 中心点位于 (-50, 0, 2) 处, 设巷道空腔电阻率值为 $1 \times 10^5 \Omega \cdot \text{m}$; 低阻异常体设于掘进迎头前方 30 m 处, 尺寸为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, 中心点位于 (40, 0, 0) 处, 电阻率值设为 $\rho_2=10 \Omega \cdot \text{m}$ 。在巷道中布设 20 个电极, 电极间距取为 5 m, 将 1 号电极置于迎头处, 测线长度共 95 m。模型示意图如图 3 所示。

以模型一为基础, 模型二不设巷道和低阻异常体, 模型三设巷道, 不布设低阻异常体, 其余参数均与模型一相同。

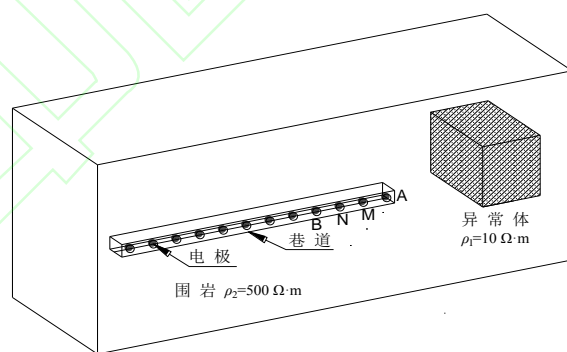


图3 超前探测模型示意图
Fig. 3 Schematic diagram of advanced detection model

完成几何模型创建后, 电流设置为 1 A, 模型电势初始值为 0, 设置边界条件为接地。选用四极装置测量, 先让电极 A 的位置不动, AM 逐渐增大, 当 B 移动到 20 号电极, 电极 A 向后移动, 依次测量, 直至 A 移动到 17 号电极, 测量过程中始终使得 $AM=MN=NB$ 。每次测量时 A、B、M、N 四个电极的位置都在变化, 需确定好测量时四个电极位置。

计算前, 对整体模型网格剖分, 选用自由四面体网格剖分; 考虑到计算精度要求和节省计算时间, 对模型无限元域、围岩网格密度选用常规, 对巷道、低阻异常体的网格密度选用极细化。

3.2 超前探测数据分析处理

直流电法超前探测受到迎头前面异常体和巷道空腔的双重作用, 巷道内部填充为空气, 其相当于一个超高阻体; 因这个超高阻体的影响, 观测到浅层的视电阻率值较高, 不能准确的探测出异常体的位置。为解决巷道对直流电法超前探测的影响, 则需对超前勘探的数据进行校正, 剔除掉巷道空腔对勘探数据结果的影响。

分析模型一计算的数据, 浅层数据较深层数据变化明显, 说明响应基本体现在浅层位, 依据浅层数据绘制视电阻率变化曲线, 图 4 所示; 其中位于迎头处 1 号电极设为坐标原点。可明显观察到原始视电阻率数据波动较大, 变化范围在 $350\text{--}600\ \Omega \cdot \text{m}$, 并且与仅设巷道时的视电阻率曲线相似, 说明数据受到巷道空腔的影响, 不能清晰地体现出异常响应, 无法判断出异常体的位置。

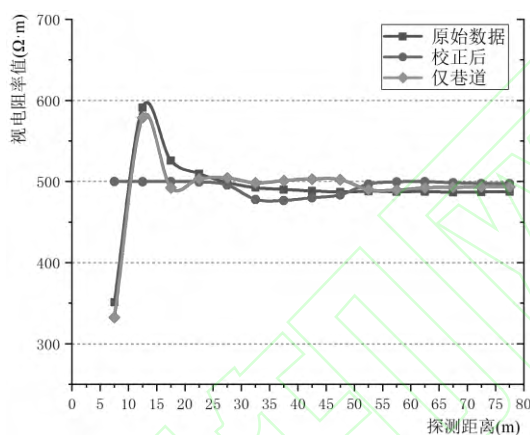


图 4 校正前后视电阻率变化曲线

Fig. 4 Change curve of apparent resistivity change before and after correction

采用“比较法”剔除掉巷道空腔对超前勘探数据结果的影响, 其计算公式为:

$$\rho_{\text{校正}} = K \rho_{\text{有巷道、有异常}} \quad (1)$$

$$K = \frac{\rho_{\text{无巷道、无异常}}}{\rho_{\text{有巷道、无异常}}} \quad (2)$$

式中: K 为校正系数, $\rho_{\text{无巷道、无异常}}$ 为不设异常体和巷道时的视电阻率值, $\rho_{\text{有巷道、无异常}}$ 为不设异常体, 仅含巷道时的视电阻率值, $\rho_{\text{有巷道、有异常}}$ 为同时设有异常体和巷道时的视电阻率值, $\rho_{\text{校正}}$ 为剔除巷道影响的视电阻率值。

采用上述公式对模型一所采集的数据进行校正, 曲线数值 (图 4) 明显下降, 其数值接近 $500\ \Omega \cdot \text{m}$, 与实际更为相符。巷道空腔的影响基本剔除后, 距离迎头 $30\text{--}50\ \text{m}$ 范围内视电阻率值明显下降, 与模型一情况相符, 说明四极装置能够识别出迎头前方异常体具体位置。

3.3 不同装置探测效果对比

为了对比二极、三极、四极装置三种装置的超前探测效果, 采用二极、三极装置对模型一进行研究, 数据采集保持供电电极位于迎头处, 使测量电极依次向后滚动测量, 对测量后的结果剔除掉巷道空腔影响后, 绘制出二极、三极装置的超前探测视电阻率变化曲线图, 并与四极装置对比, 其中位于迎头处 1 号电极设定为坐标原点。

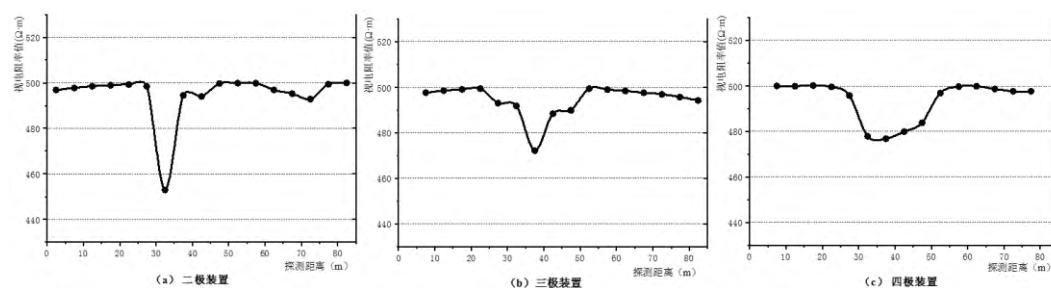


图5 不同装置视电阻率曲线图
Fig. 5 Apparent resistivity curve of different devices

如图5所示,三种装置对迎头前方30 m处的低阻体均有异常响应,二极装置的响应程度最明显,异常范围较小;三级装置的响应程度比二极装置低一些,但异常范围比二极装置大;四极装置的响应程度与三级装置相近,但有明显的低阻异常范围,且异常范围与低阻体的摆放位置基本一致。综合来看,二级装置对异常体的灵敏度最高,三级装置次之,但相较于二极和三级装置的单点供电,四极装置为两点供电,产生的电场更为稳定,横向的异常响应更为明显,异常响应范围与原模型基本吻合,所以四极装置也具有对掘进巷道超前探测的适用性。

3.4 异常体距离不同时探测效果研究

为研究四极装置对距迎头不同距离的异常体的探测效果,建立两个三维地电模型:模型四中异常体距迎头20 m,中心点位于(30, 0, 0)处;模型五中异常体距迎头40 m,中心点位于(50, 0, 0)处;其余参数均与模型一相同。剔除巷道空腔对数据的影响,绘制视电阻率变化曲线,其中位于迎头处1号电极设定为坐标原点。

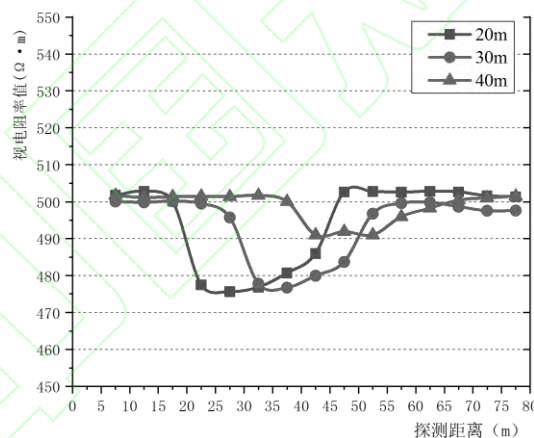


图6 异常体距离不同时视电阻率曲线图
Fig. 6 Apparent resistivity curve at different distances of anomaly

如图6所示,通过曲线可看出,四极装置对于迎头前方不同距离的低阻异常体均有较好的响应,在异常体边界有些许扩散,视电阻率值降低的位置与原模型异常体摆放位置基本符合。对比三条曲线,四极装置对不同距离的异常体响应程度不同,相较于异常体距迎头20 m和30 m,(装置灵敏度约为0.048)当异常体距离迎头40 m时,曲线视电阻率最小值与围岩背景值的差值减小,装置灵敏度为0.018,相对低阻异常区的范围也变小,说明四极装置对远距离异常体的响应能力下降;当异常体距迎头超过55 m时,灵敏度低于0.008,四极装置对低阻体的响应较差。

4 超前探测物理模拟实验

数值模拟只能从数值计算角度来验证四极装置超前探测的有效性,对于工程中对掘进迎头前方低阻异常的响应是否准确,还需要物理模拟进一步验证。在电法探测物理模拟实验主要有水槽模型实

验、土（砂）槽模型实验以及导电纸模型实验 3 种实验方法，而导电纸模型和水槽模型无法模拟其他地层和地质构造内的电流分布，并且土槽模型具有操作简单、使用方便、效率高等优点，所以本次选用土槽模型模拟研究四极装置的超前探测效果。

根据“相似性原理”，以 1: 160 比例来模拟工作面围岩、巷道、迎头及低阻异常体，围岩模型尺寸为 2.0 m×1.0 m×1.0 m，围岩边界选择以木板围成，外侧以土袋围住；电极模型选用直径 2 mm 的铜线；巷道模型采用外径 5 cm 的 PVC 空心管，长度为 1 m。电极间距为 5 cm，在巷道模型里布设 15 个电极，通过连接线将电极与电缆线连接，连接处皆用绝缘胶带绑紧，防止漏电。采用两个体积相近的 5.0 cm 厚的铁板和直径 10.0 cm 的铁球作为实验低阻异常体，体积分别为 0.0050 m³ 和 0.0052 m³。将低阻异常体置于迎头前方 12.5 cm、25 cm、37.5 cm 处，将巷道模型埋于距表层 50 cm 处。模型剖面图如 7 所示。

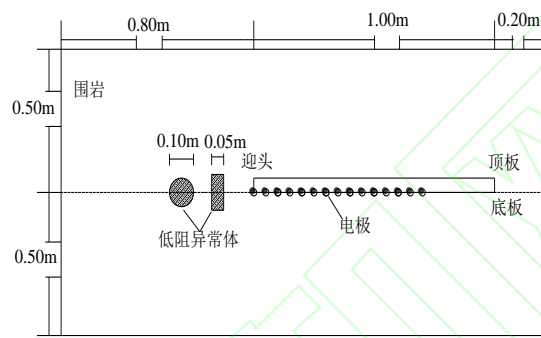


图 7 超前探测物理模型剖面图
Fig 7 Profile of physical model for advanced detection

将布置好的测线与 WDJ-6 型高密度电法仪进行连接，物理模拟实验现场布置如图 8 所示。图 8a 为模型未填埋前，可观察到异常体、巷道模型、电极的具体摆放位置，电极通过 PVC 管上的钻孔插入土中，对连接线按顺序编号，通过连接线将电极与电缆连接；图 8b 为模型填埋后，对填土进行夯实，采用四极装置进行数据采集。

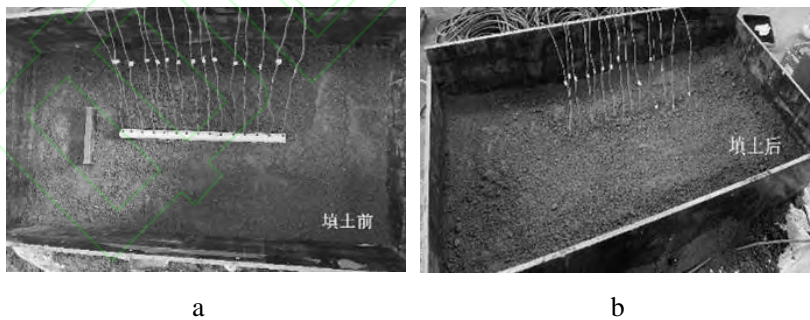


图 8 物理模拟实验现场布置图
Fig 8 Site layout of physical simulation experiment

将实验所采集的数据导出，经过数据预处理和反演计算，得到超前探测视电阻率剖面图（图 9）。图中横坐标表示距离掌子面的距离，纵坐标表示探测深度，单位为 m；以掌子面中点处作为坐标原点，橙色虚线表示异常体所埋放的位置。

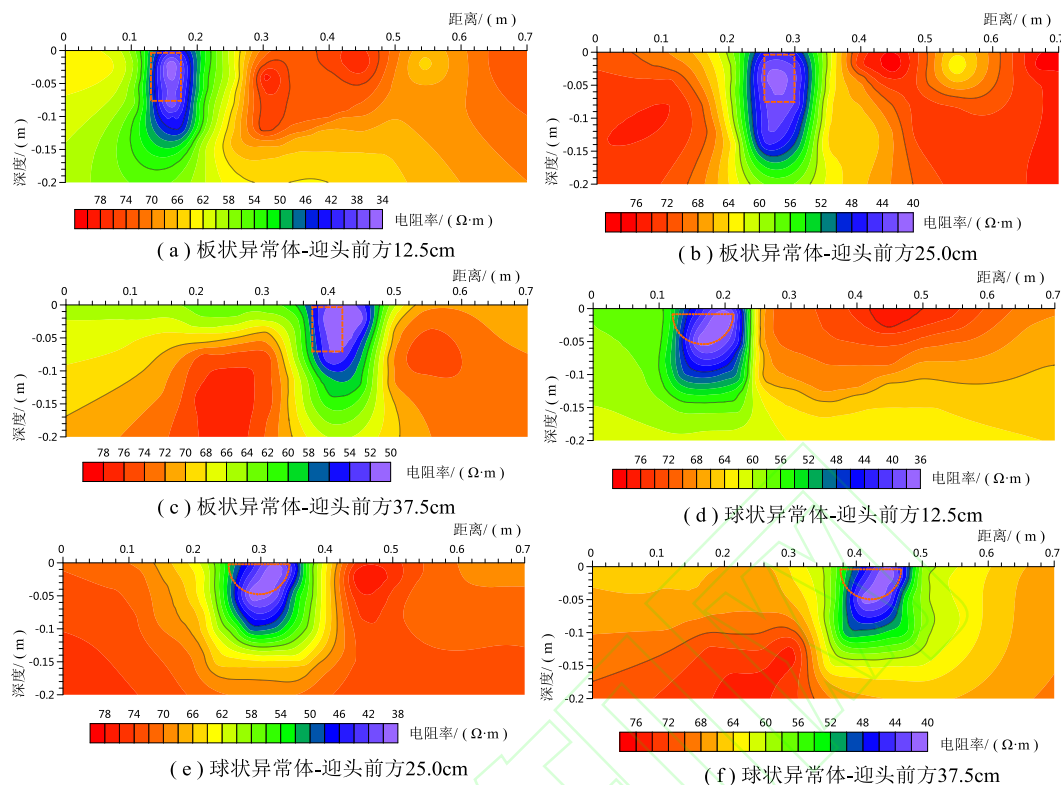


图9 不同形状异常体超前探测视电阻率剖面图

Fig 9 Apparent resistivity profiles at different shapes of anomaly for advanced detection

如图9所示,图a、b、c为迎头为前面异常体为铁板时,图a中低阻异常出现在距迎头0.13 m至0.20 m处,图b中低阻异常出现在距迎头0.24 m至0.32 m处,并且异常区呈长条状;图c中低阻异常出现在距迎头0.37 m至0.46 m处,异常区形状不规则,异常体视电阻率与周边土体电阻率差值明显减小,异常响应降低。当板状异常体的位置超过0.375 m时,四极装置对于异常体的识别能力降低。

图d、e、f为迎头为前面异常体为铁球时,异常区的横向分布基本与异常体的位置基本一致,异常区的纵向分布范围大于异常体的实际尺寸,异常区较不规则。当球状异常体距迎头0.375 m时,周边土体视电阻率差值变小。

综合图9来看,采用四极装置进行数据采集,四极装置对低阻体的异常响应较为明显,视电阻率最小值均出现在浅层,异常区的水平位置与所埋放的异常体的水平位置基本一致,能够根据异常区判断出低阻体的横向位置;深层响应较差,响应范围与异常体尺寸存在一些偏差,不能具体判断出异常体的实际大小。当异常体的距离较远时(图9c),对异常体的识别能力会明显降低;对比图9c、图9f两图,相较于板状异常体,球状异常体的异常响应更明显。

5 工程实例

经过对直流电法四极装置在掘进迎头的超前探测的数值模拟和物理模拟实验研究,四极装置均具有较好的探测效果。为研究四极装置在实际工程中的具体效果,现将其运用井下实际探测中,研究其实用性。

某矿区163采区集中运输巷在掘进过程中,巷道迎头处出现局部涌水情况,经过1天的疏放,迎头涌水量为1-2 m³/h,推测为十下灰岩局部富水导致涌水。为保证巷道的掘进安全,查清迎头前方的地质信息,矿方决定采用直流电法对迎头前方进行超前探测。

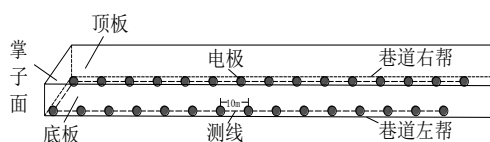


图 10 超前探测工作布置图
Fig. 10 Construction plan for advanced detection

现场施工选用四极装置进行数据采集, 采用 U 形布极方式, 电极间距 10 m, 其中 15 号、16 号电极布设于迎头的两侧, 其余电极分别布设巷道两帮, 如图 10 所示。四极装置所采集的数据经过数据预处理后, 利用软件 Matlab 与 RES3DINV 进行数据的反演处理, 最后绘制超前探测反演结果图, 如图 11 所示, 其中视电阻率值用以 10 为底的对数形式表示, 图中颜色由红色到紫色表示视电阻率值越来越小。图中 (0, 0, 0) 点为掘进迎头的中点处, X 轴为距迎头的距离, Y 轴为超前探测宽度, Z 轴超前探测深度。

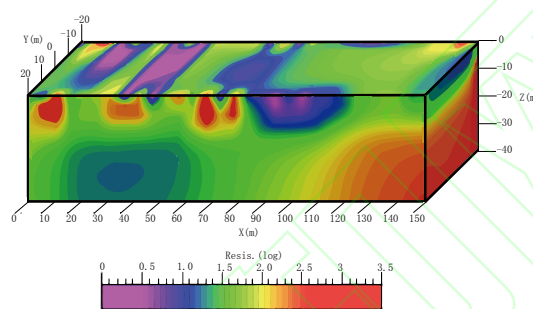


图 11 超前探测反演结果图
Fig. 11 Inversion results for advanced detection

由图 11 可知低阻异常区主要集中在巷道前方 15-25 m, 35-45 m, 65-80 m, 深度在 0-15 m 范围内。通过地质资料与现场实际信息综合分析, 该处地层岩性为灰岩, 并且异常区主要位于下灰岩层中, 探测到的异常推断为灰岩含水后呈现低阻异常响应, 不存在陷落柱、导水断层、不明采空区等隐患地质构造。异常区位置确定后, 为提高超前探测的精度, 确保施工的安全进行, 还需结合其他物探方法进一步勘探。通过对异常区进行钻孔验证, 该位置富水性不强, 在疏导水结束后, 巷道已安全通过前方异常区。

直流电法四极装置在实际工程中, 探测效果较好, 能够对迎头前方不良地质体产生明显的异常响应; 并且不需要布设无穷远供电电极, 大大提高了工作效率, 缩短了施工时间, 节省了人力和物力, 证明该技术具有较高的实用性。

6 结论

1) 本文通过数值模拟研究直流电法四极装置超前探测效果, 剔除巷道空腔影响后, 探测结果与理论模型基本相符, 证明直流电法四极装置能够实现巷道超前探测。并且四极装置的横向的响应特征要优于二极和三极装置, 当低阻体距迎头超过 55 m 时, 低阻异常响应降低。

2) 通过构建土槽物理模拟实验平台, 研究在实际环境中直流电法四极装置对掘进迎头前方低阻体的响应, 实验表明实际环境中依然具有明显的异常响应; 当异常体距迎头超过 0.375 m 时, 四极装置对于异常体的识别能力降低, 且球状异常体的响应要优于板状异常体。

3) 将四极装置超前探测运用到现场工程实例中, 结合钻孔验证取得了良好的效果, 证明该技术具有很强的实用性和推广性。

References

- [1] Cheng J L, Li F, Peng S P, et al. 2014. Research progress and development direction on advanced detection in mine roadway working face using geophysical methods[J]. Journal of China Coal Society(in Chinese), 39(8): 1742-1750, doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.9007.
- [2] Cheng J L, Wang Y H, Yu S J, et al. 2000. The principle and application of advance surveying in roadway excavation by resistivity method[J]. Coal Geology & Exploration(in Chinese), (4): 60-62, doi:10.3969/j.issn.1001-1986.2000.04.019.

- [3] Di Q Y, Shi K F, Wang M Y, et al. 2001. Exploration of groundwater resources by CASMT method and high density resistivity method[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 16(3): 53-57.
- [4] Dong J, Zhai P H, Chen L, et al. 2012. Discussion and Application of Electrical Prospecting Technology[J]. Science Technology and Engineering(in Chinese), 12(16): 3944-3946, doi:10.3969/j.issn.1671-1815.2012.16.033.
- [5] Dong Y, Xiao J, Liu Y, et al. 2022. Application of high-density electric method in exploration of tunnel engineering[J]. Geotechnical Engineering Technique(in Chinese), 36(1): 70-73.
- [6] Feng Y J, Wang B C, Li Y B, et al. 1998. Application and effect of point power method in advance detection of coal roadway[J]. Hebei Coal(in Chinese), (4): 9-11.
- [7] Gao W F, Jia L B, Hu A S, et al. 2021. Research and application of multi device DC electrical exploration in karst exploration [J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 36 (6): 2687-2692.
- [8] Han D P, Shi X F, Shi X X, et al. 2019. Study on anomaly characteristics of in-advance DC electric detection of water-accumulated roadway in abandoned coal mines[J]. Coal Science and Technology(in Chinese), 47 (4): 157-161, doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.04.026.
- [9] Han D P, Zhao P, Li D. 2009. Application status and development prospects of mine geophysical exploration technology[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 24(5): 1839~1849, doi:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.05.039.
- [10] Liu B, Li S C, Nie L C, et al. 2012. Advanced detection of water-bearing geological structures in tunnels using 3D DC resistivity inversion tomography method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering(in Chinese), 34(10): 1866-1876, doi:CNKI:SUN:YTGC.0.2012-10-016.
- [11] Ma B Z, Li X. 2013 Roadway influences on advanced DC detection in underground mine[J]. Coal Geology & Exploration(in Chinese), 41(1): 78-81, doi:10.3969/j.issn.1001-1986.2013.01.016.
- [12] Qiang J K, Luo Y Z. 2007. 3D terrain DC resistivity finite element simulation [J]. Journal of Geophysics(in Chinese), (5): 1606-1613, doi:10.3321/j.issn.0001-5733.2007.05.038.
- [13] Qiang J K, Ruan B Y, Zhou J J, et al. 2011. Feasibility of DC three pole method for advanced detection of coal mine roadway [J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 26 (1): 320-326, doi:10.3969/j.issn.1004-2903.2011.01.038.
- [14] Shi L Q, Zhai P H, Wei J C, et al. 2009. Application of three-dimensional high density resistivity to detection of floor water[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 24(2): 733-736, doi:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.050.
- [15] Shi L Q, Niu C, Zhai P H, et al. 2013. Application of three-dimensional high density resistivity technique in detecting roof water[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 28(6): 3276-3279, doi: 10.6038/pg20130655.
- [16] Wang M, Liu Y, Mu Y, et al. 2021. Research and application of multi-array mine DC electrical method for roadway advanced detection[J]. Journal of China Coal Society(in Chinese), 46(S1): 396-405.
- [17] Wang X L, Feng H, Li P, et al. 2011. Application of COMSOL Multiphysics to pilot detection positive evolution of mine resistivity[J]. Coal Science and Technology(in Chinese), 39(11): 112—117, doi:CNKI:11-2402/TD.20111115.1507.013.
- [18] Wang X L, Feng H, Tian H G, et al. 2011. Direct current forward modeling based on COMSOL MULTIPHYSICS[J]. Coal Geology & Exploration(in Chinese), 39(5): 76-80, doi:10.3969/j.issn.1001-1986.2011.05.019.
- [19] Xie H J, Qu T T, Li Z Q. 2021. Study on simulation test of detection flume by direct current method in goaf of shallow buried coal seam[J]. Coal Science and Technology(in Chinese), 49 (3): 160-166.
- [20] Yue J H, Xue G Q. 2016. Review of the 36 year development of China's coal electrical exploration [J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 31 (4): 1716-1724, doi:CNKI:SUN:DQWJ.0.2016-04-041.
- [21] Zhai P H, Ren K K, Zhang Z, et al. 2021. Three-dimensional electrical method advanced detection technology based on comparative method to eliminate the influence of roadway[J]. Safety in Coal Mines(in Chinese), 52(7): 67-71, doi:10.13347/j.cnki.mkaq.2021.07.011.
- [22] Zhang M M, Shi X X. 2022. Forward modeling of progressive array advance detection of roadway[J]. Coal Technology(in Chinese), 41(4): 71-74.
- [23] Zhang J, Zhao Y, Ma B Z. 2012. Research on mine DC electric field based on ANSYS [J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 27 (6): 2609-2616, doi:10.6038/j.issn.1004-2903.2012.06.039.

附中文参考文献

- [24] 程久龙, 李飞, 彭苏萍, 等. 2014. 矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 39(8): 1742-1750, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.9007.
- [25] 程久龙, 王玉和, 于师建, 等. 2000. 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, (4): 60-62, doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2000.04.019.
- [26] 底青云, 石昆法, 王妙月, 等. 2001. CSAMT 法和高密度电法探测地下水资源[J]. 地球物理学进展, 16(3): 53-57.
- [27] 董健, 翟培合, 陈磊, 等. 2012. 电法超前探技术探讨与应用[J]. 科学技术与工程, 12(16): 3944-3946, doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2012.16.033.
- [28] 董耀, 肖娟, 刘岩, 等. 2022. 高密度电法在隧洞工程勘察中的应用[J]. 岩土工程技术, 36(1): 70-73.
- [29] 冯玉静, 王邦成, 李玉宝, 等. 1998. 点电源法在煤矿巷道超前探测中的应用及效果[J]. 河北煤炭, (4): 9-11, doi: CNKI: SUN: HBMT. 0. 1998-04-005.
- [30] 高卫富, 贾李博, 胡安顺, 等. 2021. 直流电法多装置探测在岩溶探查中的研究及应用[J]. 地球物理学进展, 36(6): 2687-2692.
- [31] 韩德品, 石学锋, 石显新, 等. 2019. 煤矿老窑积水巷道直流电法超前探测异常特征研究[J]. 煤炭科学技术, 47(4): 157-161, doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.04.026.
- [32] 韩德品, 赵锴, 李丹. 2009. 矿井物探技术应用现状与发展展望[J]. 地球物理学进展, 24(5): 1839-1849, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.05.039.
- [33] 刘斌, 李术才, 聂利超, 等. 2012. 隧道含水构造直流电阻率法超前探测三维反演成像[J]. 岩土工程学报, 34(10): 1866-1876, doi: CNKI: SUN: YTGC. 0. 2012-10-016.
- [34] 马炳镇, 李貅. 2013. 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, 41(1): 78-81, doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2013.01.016.
- [35] 强健科, 罗延钟. 2007. 三维地形直流电阻率有限元法模拟[J]. 地球物理学报, (5): 1606-1613, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2007.05.038.
- [36] 强健科, 阮百尧, 周俊杰, 等. 2011. 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, 26(1): 320-326,

- doi: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2011. 01. 038.
- [37] 施龙青, 翟培合, 魏久传, 等. 2009. 三维高密度电法在底板水探测中应用[J]. 地球物理学进展, 24 (2): 733-736, doi: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2009. 02. 050.
- [38] 施龙青, 牛超, 翟培合, 等. 2013. 三维高密度电法在顶板水探测中应用[J]. 地球物理学进展, 28 (6): 3276-3279, doi: 10. 6038/pg20130655.
- [39] 王敏, 刘玉, 牟义, 等. 2021. 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, 46 (S1): 396-405.
- [40] 王小龙, 冯宏, 李萍, 等. 2011. 矿井电阻率超前探测正演模拟[J]. 煤炭科学技术, 39 (11): 112-117, doi: CNKI: 11-2402/TD. 20111115. 1507. 013.
- [41] 王小龙, 冯宏, 田华光, 等. 2011. 基于 COMSOL MULTIPHYSICS 的直流电法正演模拟[J]. 煤田地质与勘探, 39 (5): 76-80, doi: 10. 3969/j. issn. 1001-1986. 2011. 05. 019.
- [42] 解海军, 屈婷婷, 李志强. 2021. 浅埋煤层采空区直流电法探测水槽模拟试验研究[J]. 煤炭科学技术, 49 (3): 160-166.
- [43] 岳建华, 薛国强. 2016. 中国煤炭电法勘探 36 年发展回顾[J]. 地球物理学进展, 31 (4): 1716-1724, doi: CNKI: SUN: DQWJ. 0. 2016-04-041.
- [44] 翟培合, 任科科, 张钊, 等. 2021. 基于比较法消除巷道影响的三维电法超前探测技术[J]. 煤矿安全, 52 (7): 67-71, doi: 10. 13347/j. cnki. mkaq. 2021. 07. 011.
- [45] 张淼淼, 石显新. 2022. 巷道渐进式排列超前探测正演模拟[J]. 煤炭技术, 41 (4): 71-74.
- [46] 张军, 赵莹, 马炳镇. 2012. 基于 ANSYS 的矿井直流电场研究[J]. 地球物理学进展, 27 (6): 2609-2616, doi: 10. 6038/j. issn. 1004-2903. 2012. 06. 039.