

掘进工作面“三角锥”型直流电法超前探测正演研究

周官群¹,王亚飞¹,陈兴海²,岳明鑫²,翟福勤³,杨晓冬²,吴小平²,曹煜^{2,3},崔颖¹

(1.合肥工业大学 资源与环境工程学院,安徽 合肥 230009;2.中国科学技术大学 地球和空间科学学院,安徽 合肥 230026;3.安徽惠洲地质安全研究院股份有限公司,安徽 合肥 231202)

摘要:为提高煤矿井下巷道超前探测水害和构造异常的准确性,利用超前探水的 3 个钻孔,并将这 3 个钻孔设计为互成 28°的“三角锥”型,利用“三角锥”型观测系统的孔中三维直流电法进行超前探测突水灾害工作。在均质全空间和层状模型条件下设计体状低阻异常和板状低阻异常正演模型,并与传统直流电法超前探测对低阻异常响应特征进行比较。结果可见:①传统直流电法超前探测系统在均质模型下,对体状低阻异常和板状低阻异常的响应基本相当;但在层状模型中“三角锥”型观测系统对体状异常的响应比传统超前探测系统大几十倍;而“三角锥”型观测系统对板状异常的响应是体状异常响应的数倍;②“三角锥”型观测系统对异常的响应比传统超前探测系统更强,且对低阻模型产生的响应是传统超前探测系统的数十倍甚至百倍,更有利于异常信号的获取;③由于电极布置在孔中,“三角锥”型观测系统极大地减小了巷道内各种人文因素对信号的干扰,规避了传统直流电法超前探测存在的问题,是超前探测一个新的解决方案,对均质模型下的简单地质异常体通过弧线交汇法可进行定位,而复杂模型的空间精确定位还有待电阻率三维反演解决。

关键词:三维直流电法;超前探测;“三角锥”型观测系统;正演模拟

中图分类号:P631.3

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2022)08-3015-09

Research on forward modeling of “triangular cone” type direct current method for heading detection

ZHOU Guanqun¹, WANG Yafei¹, CHEN Xinghai², YUE Mingxin², ZHAI Fuqin³, YANG Xiaodong²,
WU Xiaoping², CAO Yu^{2,3}, CUI Ying¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Anhui Huizhou Geology Security Institute Co., Ltd., Hefei 231202, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of advanced detection of water disaster and structural anomaly in coal mine roadway, three boreholes for advanced water detection are used. These three boreholes are designed as “triangular cone” with 28 degrees each other, and three-dimensional direct current method in the holes of “triangular cone” observation system is used for the advanced detection of water inrush disaster. Under the condition of a homogeneous full-space and layered model, the forward modeling models of bulk low-resistance anomaly and plate low-resistance anomaly are designed, and the response characteristics of the low-resistance anomaly are compared with those of the traditional DC method. The results are as follows: ① Under the homogeneous model, the response

收稿日期:2022-05-31 修回日期:2022-07-09 责任编辑:韩晋平 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.WX22.0809

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2039206,41874084);安徽省自然科学基金资助项目(2008085QD176)

作者简介:周官群(1980—),男,安徽合肥人,教授,博士生导师。E-mail:guanqunzhou@126.com

通讯作者:吴小平(1967—),男,江西抚州人,教授,博士生导师。E-mail:wxp@ustc.edu.cn

引用格式: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 Guanqun, WANG Yafei, CHEN Xinghai, 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.



移动阅读

of the traditional direct current method of advanced observation system to the body-shaped and plate-shaped low-resistance anomalies is almost the same. However, in the layered model, the response of “triangular cone” type observation system to the body-shaped anomaly is dozens of times larger than that of traditional advanced detection system. The response of “triangular cone” type observation system to the plate-shaped anomaly is several times larger than that of the body-shaped anomaly. ② The response of “triangular cone” type observation system to anomaly is stronger than that of traditional advanced observation system, and the response to low-resistance model is dozens or even hundreds of times larger than that of traditional advanced observation system, which is more conducive to the acquisition of anomaly signals. ③ Since the electrodes are arranged in the holes, the “triangular cone” type observation system greatly reduces the interference of various human factors in the roadway to the signal, avoids the problems existing in the traditional DC method of advanced detection, and is a new solution for advanced detection. The simple geologic anomaly body under a homogeneous model can be located by the arc intersection method, while the spatial accurate location of the complex model needs to be solved by three-dimensional resistivity inversion.

Key words: 3-D direct current method; advanced detection; “triangular cone” observation system; forward modeling

根据中国工程院预测:到 2050 年煤炭在我国一次能源消费比例仍将保持在 50% 左右,以煤炭为主导的能源结构难以改变,一次消费能源以煤炭为主是我国发展的必然选择^[1]。与世界主要产煤大国相比,我国煤矿开采工程地质条件复杂多变^[2]。随着浅部煤炭资源的逐渐枯竭,我国煤矿开采深度不断加大,煤矿深部受到高承压水的水害威胁越来越严重,煤矿突水甚至淹井等煤矿水害的事故频频发生,造成生命和财产的巨大损失,掘进工作面水害的超前探测具有重大意义。

直流电法超前探测技术被作为《煤矿安全规程》《煤矿防治水细则》等推荐的成熟技术,在国内已有 20 多年的应用历史,也是掘进工作面前方水害探查的主要矿井物探方法之一。目前公开发表的直流电法超前探测的学术论文有 200 余篇^[3],但鲜见国外文献的相关报道,国内学者分别从现场探测装置、处理方法、数据正反演等各种因素对结果的影响做了比较细致的研究。文献[4-6]分别提出以两点三极法、三点-三极和七电极系的超前探测系统。王运彬和于师建^[7]结合超前水平钻孔,提出了孔内直流电法超前探测。岳建华^[8]、刘树才^[9]等对矿井直流电法进行了相关正演模拟,并从理论分析、资料处理及工程应用上对矿井直流电法进行了系统的研究,黄俊革等^[10-11]进行了坑道内直流电法有限元正演模拟,指出了边界影响和巷道空间、金属管道等对结果的影响,并采用最小二乘法对超前探测视电阻率曲线进行快速反演,指出反演结果只能确定异常体的厚度和电阻率的组合值。文献[12-16]通过数值模拟,指出了直流电法超前探测结果受到巷道空间的影响与电极和巷道的相对位置、几何尺寸、角度等大小有关。文献[17-20]提出了井巷三维电阻率成像,利用巷道有限

空间进行三维电阻率超前探测,从数值模拟和物理模型试验及工程应用 3 个方面进行了研究,提出二维偏移结合三维反演成像的数据处理手段,具有一定的应用效果。成果解释方面,为了提高电法超前探测技术在巷道探测的准确度,有关学者提出了超前探测模型及预测公式。程久龙等^[21]通过求解全空间三层介质点电源电场分布,获得 $d_{\text{pre}} = (0.8 \sim 1.0)x_{\text{min}}$ 的预测公式;黄俊革等^[22]通过巷道前方无限大低阻板体的数值模拟,获得 $d_{\text{pre}} = (0.10 \sim 0.25)x_{\text{min}}$ 的预测公式(其中, d_{pre} 为预测距离; x_{min} 为视电阻率曲线最小值位置);韩光等^[23]通过沙槽实验得出了矿井直流电法超前预报球体构造的经验公式 $d_{\text{pre}} = 0.8x_{\text{min}} - 4.0$ 。刘洋等^[24]则开展任意各向异性三维非结构有限元算法研究,获得 $d_{\text{pre}} = 0.432x_{\text{min}} + 4.48$ 的预测公式。

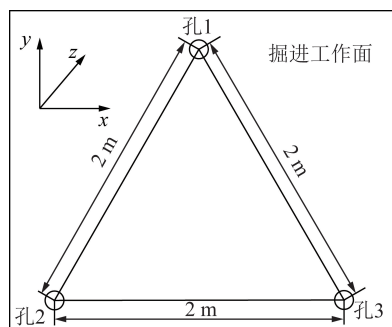
目前有不少学者对直流电法超前探测技术的准确性提出了质疑^[25-26],究其原因是直流电法超前探测的基本原理从均匀全空间点电源电场出发,通过在掘进工作面附近布置点电源形成全空间电流场,在后方采集电位差数据,提取前方异常体信息,进而实现超前探测。该方法理论虽可行,但实际探测中巷道后方的异常信号较弱,且越往后方信号越弱,必须用高精度的记录设备进行针对性的处理,且掘进工作面的浮矸、积水,巷道开挖引起的岩体松动及各种大型掘进设备等的影 响,导致直流电法超前探测的准确度受到很大影响,最为关键的是,实际煤系地层为层状介质,且存在各向异性,并非均匀全空间介质,点电源电场在层状地层的全空间分布与均质全空间分布规律完全不同。

据统计,近 30 a 来在矿井物探方面的理论基础研究偏少^[3],大部分的研究偏向于工程应用。从实际探测效果来看,传统的直流电法超前探测不能完全解决工作面前方的水害问题。在复杂地质条件下,为

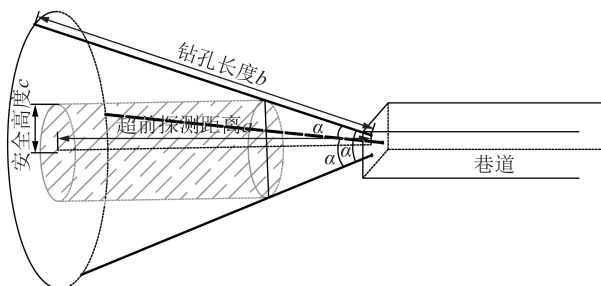
进一步提高直流电法超前探测的准确性,本研究将巷道超前探放水的3个钻孔进行重新设计,即将《煤矿防治水细则》里第43条规定的,几种复杂地质条件下所布置的3个超前探放水孔设计为互相成一定角度的“三角锥”型立体观测系统,进行直流电法掘进工作面的三维直流超前探测研究。通过建立均质全空间模型和层状模型,对体状低阻异常和板状低阻异常进行正演模拟,结果显示“三角锥”型观测系统对2种低阻异常的响应是传统直流电法超前探的数十倍甚至数百倍,确定了“三角锥”型观测系统进行超前探测的可行性。

1 “三角锥”型观测系统的钻孔设计及数据采集

受巷道空间的限制,传统的巷道直流电法超前探测只能利用巷道空间布置1条或多条直流电法测线,



(a) 钻孔布置及坐标系



(b) 三角锥型观测系统示意

图1 “三角锥”型观测系统设计

Fig.1 “Triangular cone” observation system

2 巷道全空间正演理论

全空间中的点电源电场可视为全空间电位场,设在三维直角坐标系中,场源是一个位于 $A(x_A, y_A, z_A)$ 点、电流强度为 I 的点电源,则全空间中任意一点 (x, y, z) 满足的电位控制方程^[27]有

$$\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla u(x, y, z)] = -I\delta(x - x_A)\delta(y - y_A)\delta(z - z_A) \quad (1)$$

式中, δ 为狄拉克函数; σ 为计算区域内任意点的电导率; u 为电位。

右端项 $f = -I\delta(x - x_A)\delta(y - y_A)\delta(z - z_A)$,由狄拉克函数 δ 可知:在点电流源节点以外, $f = 0$;而在点电流源所在的网格节点上, $f \rightarrow \infty$ 。这将导致计算结果出现较大误差,特别是在点电流源附近误差量级更大,也就是总电位场 u 在点电流源的位置存在奇异性。

针对点电流源的奇异性问题,可以采用解析和数值计算相结合的算法来解决。用解析法计算点电流源 A_i 在矿井全空间条件下产生的正常电位 u_a ,而用数值方法计算导电异常体引起的异常场电位 u_d ,由2

获得巷道前方一维或三维的探测结果,观测系统布置相对单一,电极布置受巷道内各类干扰因素影响。作者根据《煤矿防治水细则》规定:防水煤柱应根据地质构造、水文地质条件、煤层赋存条件、围岩物理力学性质、开采方法及岩层移动规律等因素综合确定,但不得小于20 m。

考虑钻探超前距为100 m,钻孔长度120 m,在巷道掘进工作面将原探放水的3个钻孔设计为等边三角形布置,如图1(a)所示,3个钻孔呈三角锥形且两两钻孔之间夹角 $\alpha \approx 28^\circ$,如图1(b)所示。数据可采用单点电源供电方式,在巷道后方布置一无穷远电极B和参考电极G,依次进行每个电极的供电和数据采集,数据采集更加快捷。三角锥的正中心对应掘进走向 33° ,此参数的设计可以在巷道前方30~100 m内,始终保持20 m的安全高度。

者相加获得实际电场的电位 u 。文中数值计算采用有限差分法,则异常场电位 u_d 满足边值问题。

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\sigma \nabla u_d) = -\nabla \cdot (\sigma - \sigma_0 \nabla u_a) \\ \sigma = \frac{\partial u_d}{\partial n} \Big|_{\Gamma_0} = 0 \\ \left(\frac{\partial u_d}{\partial n} + \cos \theta \frac{u_d}{r} \right) \Big|_{\Gamma_R} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, Γ_0 为地面边界; Γ_R 为近似的无穷远边界; σ_0 为围岩电导率; r 为任意点到点电源距离; θ 为边界点径向 r 与边界面法向 n 的夹角。

式(2)利用有限差分法进行离散,得到大型线性方程组 $Au_d = b$ (A 为电阻率正演算子; b 为与源位置有关的向量),对该大型线性方程组采用不完全Cholesky共轭梯度法进行求解^[27-29]。

3 模型正演

为直观说明观测系统的有效性,分别在均质全空间条件下和全空间层状介质条件下,利用传统直流电

法超前探测模式和“三角锥”型观测系统超前探测模式的正演模型,进行同一模型下 2 种观测系统不同位置处的异常响应比较。

3.1 均质全空间模型

(1) 对体状低阻异常的对比。

建立均质全空间条件下传统直流电法超前探测(图 2)和“三角锥”型超前探测(图 3)的正演模型,假设在全空间均质条件下,考虑巷道影响,巷道电阻率 $\rho_h = 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$,围岩电阻率 $\rho_r = 100 \Omega \cdot \text{m}$,低电阻率 $\rho_L = 1 \Omega \cdot \text{m}$,异常体尺寸为 $15 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$,正方体异常体位于巷道正前方,中心距巷道掘进工作

面 60 m ,供电电流 1 A 。

传统直流电法超前探电极间距为 4 m ,共布置 32 个电极,电极编号从掘进工作面向后分别为 1 号、2 号、…、32 号,“B”极放置在无穷远。“三角锥”型观测系统钻孔在巷道掘进工作面呈等边三角形布置,中心朝向正前方,两两钻孔间夹角为 28° ,3 个钻孔中电极顺序从孔口至孔底分别为 1~32 号、33~64 号、65~96 号。取传统超前探测系统下 1 号电极供电和“三角锥”型观测系统下 32 号电极供电时,各接收电极的电压值,比较背景 U_b 和加体状异常 U_a 条件下电压响应及其变化量 $\Delta U = (U_a - U_b)/U_a \times 100\%$,如图 4 所示。

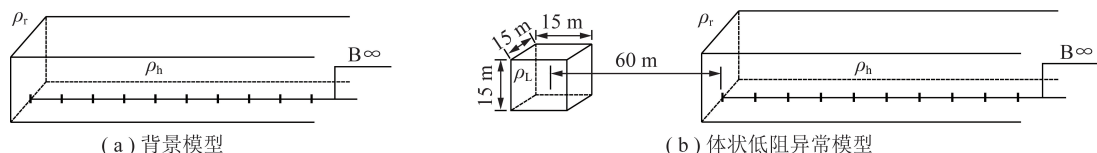


图 2 均质全空间下传统直流电法超前探测背景及体状低阻异常正演模型

Fig.2 Traditional DC method is used to explore the background and forward modeling of bulk low resistivity anomalies in homogeneous full space

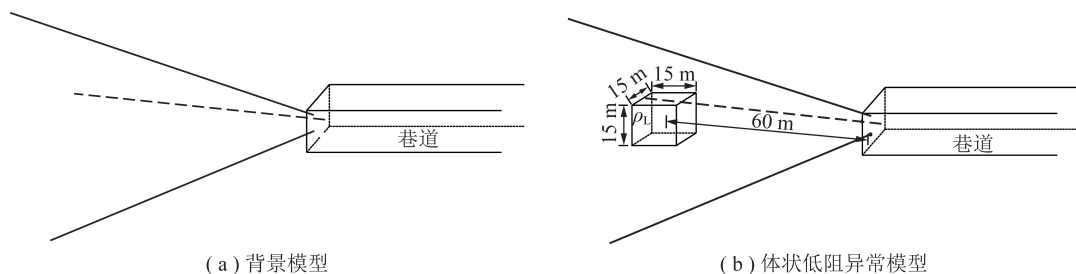


图 3 均质全空间下“三角锥”型观测系统超前探测背景及体状低阻异常正演模型

Fig.3 “Triangular cone” type observation system is used to explore the background and forward modeling of bulk low-resistivity anomalies in homogeneous whole space

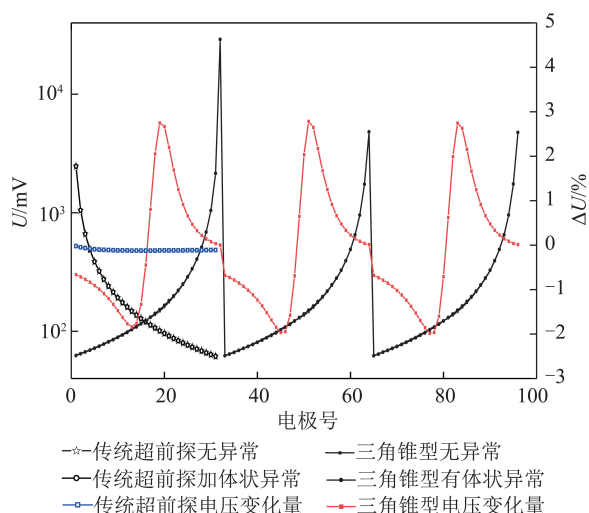


图 4 均质模型下 2 种观测系统对体状异常电压响应对比

Fig.4 Comparison of response of two observation systems to volume abnormal voltage under homogeneous model

传统超前探测在掘进工作面 1 号电极供电时, 2~32 号电极处电压逐渐降低,加体状异常后的电压曲线与背景相比变化较小,由电压变化量曲线可见变化量最高为 0.12% 。“三角锥”型观测系统在掘进工作面 32 号电极供电时,1~31 号电极方向,33~64 号电极方向及 65~96 号电极方向电位逐渐升高,加体状异常后的电压曲线与背景相比在距孔口直线距离 $36 \sim 96 \text{ m}$ (10~25 号、42~57 号、74~89 号电极) 处电压变化明显,电压变化量达 $-1.7\% \sim 2.7\%$,极值点位于 3 个钻孔到孔口直线距离 48 m 和 72 m 处。

(2) 对板状异常的对比。

设置板状低阻体模型,低阻异常体尺寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,板状体异常体垂直于巷道正前方,中心距巷道掘进工作面 60 m ,供电电流 1 A 。其他参数同体状低阻异常体模型。模型如图 5 所示。此时钻孔已从板状体中穿过。

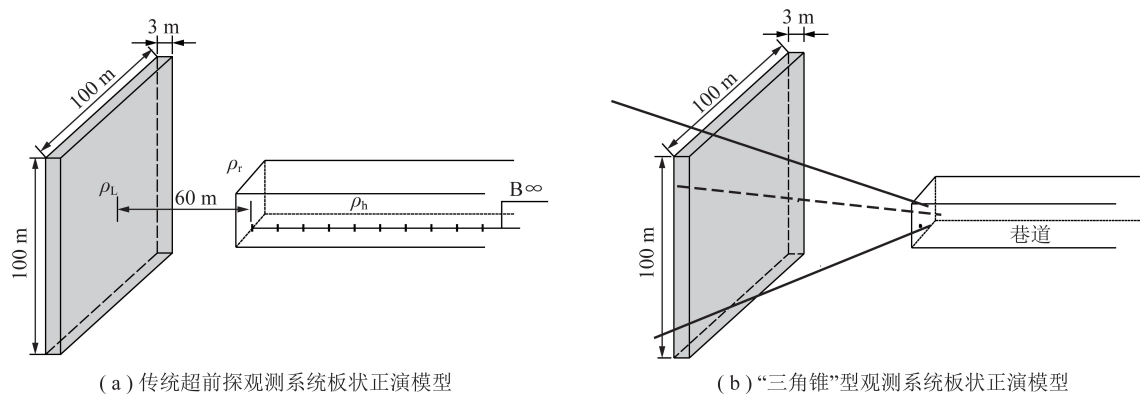


图 5 均质全空间模型下 2 种观测系统对板状低阻异常的正演模型

Fig.5 Forward modeling of plate low resistivity anomalies for two observation systems in homogeneous whole space

取传统超前探观测系统下 1 号电极供电和“三角锥”型观测系统下 32 号电极供电时,各接收电极的电压值,比较背景和加板状异常条件下电压响应及其变化量 ΔU ,如图 6 所示。

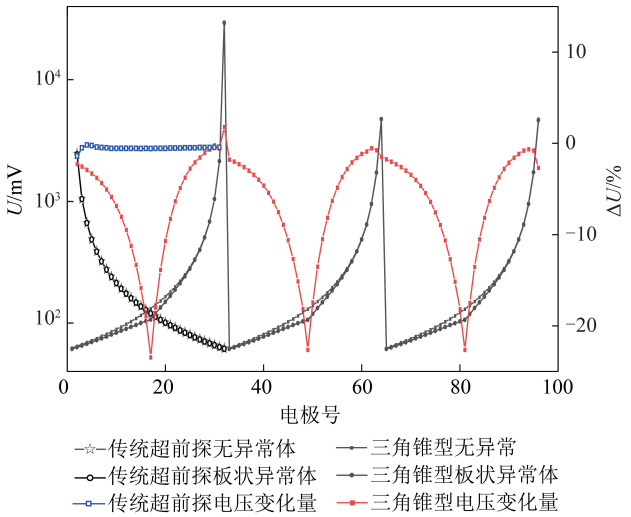


图 6 均质模型下 2 种观测系统对板状低阻异常电压响应对比
Fig.6 Comparison diagram of response of two observation systems to plate low resistance abnormal voltage under homogeneous model

传统超前探在掘进工作面 1 号电极供电时, 2~32 号电极处电压逐渐降低,加板状异常后的电压曲线与背景相比变化较小,电压变化量在 0.2% 以内。

“三角锥”型观测系统在掘进工作面 32 号电极供电时,1~31 号电极方向,33~64 号电极方向及 65~96 号电极方向电位逐渐升高,加板状异常后的电压曲线与背景相比在到孔口直线距离 36~96 m (10~25 号、42~57 号、74~89 号电极) 处电压变化明显,距孔口直线距离 64 m 处电压变化量最高达 23.4%。

3.2 层状全空间模型

(1) 对体状低阻异常的对比。

建立层状模型条件下传统直流电法超前探测 (图 7) 和“三角锥”型超前探测 (图 8) 的正演模型,层状模型参考中煤新集矿区地层模型进行设置,使得模型更接近实际地层^[30],考虑巷道影响,巷道电阻率 $\rho_h = 10^{12} \Omega \cdot m$,各层电阻率及对应厚度见表 1,其中层 3 为含水层。

表 1 中上界面厚度设置为 500 m,电阻率与层 1

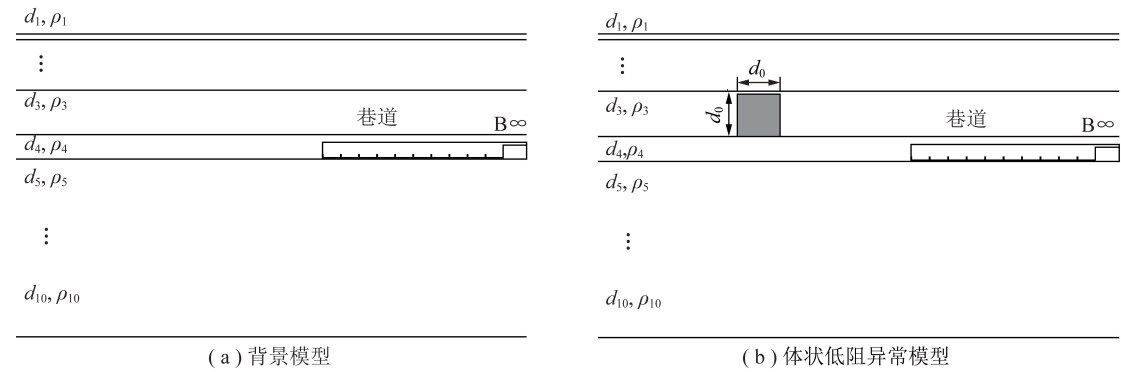


图 7 层状模型下传统直流电法超前探测背景及体状低阻异常正演模型

Fig.7 Traditional DC method for advanced exploration background and forward modeling of bulk low-resistivity anomalies under the layered model

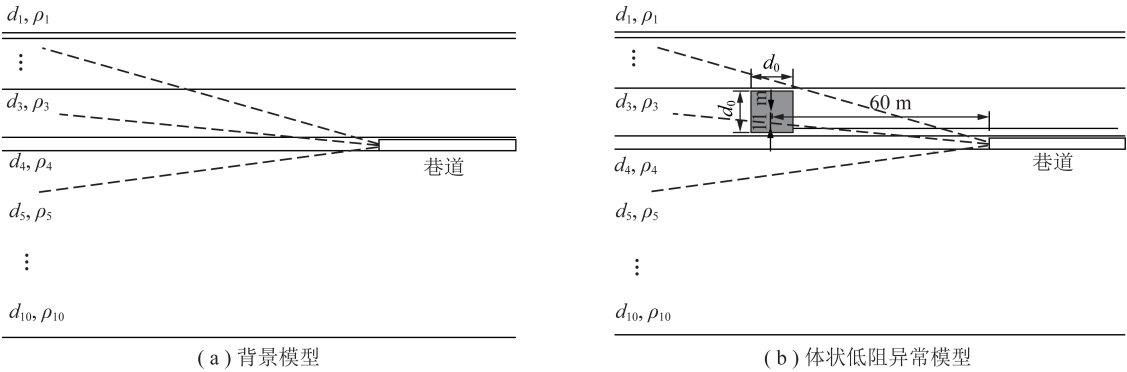


图 8 层状模型下“三角锥”型观测系统背景及体状低阻异常正演模型

Fig.8 “Triangular cone” type observation system background and volumetric low resistance anomaly forward model under the layered model

表 1 层状模型电阻率及厚度参数

Table 1 Resistivity and thickness parameters of the layered model

项目	厚度 d/m	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot \text{m})$
上界面	500.0	987
层 1	2.4	987
层 2	18.0	342
层 3	17.0	260
层 4	5.0	630
层 5	11.0	400
层 6	4.0	84
层 7	33.0	84
层 8	5.0	369
层 9	13.0	74
层 10	14.0	159
下界面	500.0	159

一致,下界面厚度设置为 500 m,电阻率与层 10 一致,设置低阻 $\rho_{\text{L}} = 1 \Omega \cdot \text{m}$,体状低阻异常体尺寸为 $15 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$,正方体异常体位于巷道前方含水层 3 中,中心距巷道掘进工作面 60 m,供电电流 1 A。

2 种观测系统电极坐标及顺序设置同均质模型,见 3.1 节。取传统超前探测观测系统下 1 号电极供电和“三角锥”型观测系统下 32 号电极供电时各接收电极的电压,比较背景和加体状异常条件下电压响应及其变化量 ΔU ,如图 9 所示。

层状模型下,传统超前探在掘进工作面 1 号电极供电时,2~32 号电极处电压逐渐降低,加体状异常后的电压曲线与背景相比变化较小,电压变化量在 0.045% 以内,变化量极小;“三角锥”型观测系统在

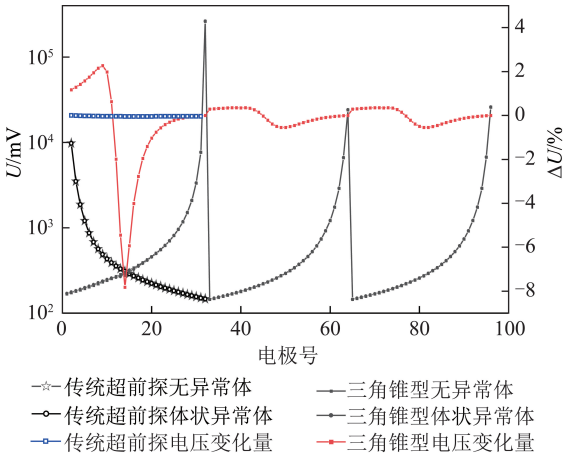


图 9 层状模型下 2 种观测系统对体状低阻异常电压响应对比

Fig.9 Comparison diagram of response of two observation systems to volumetric low resistance abnormal voltage under layered model

掘进工作面 32 号电极供电时,1~31 号电极方向,33~64 号电极方向及 65~96 号电极方向电位逐渐升高,加体状异常后与背景相比的电压曲线在距孔口直线距离 52,64 和 64 m(14 号、49 号、81 号电极)范围内电压变化最大,电压变化量在 52 m(14 号电极)附近处最高达 7.8%。

(2) 对板状低阻异常的比较。

设置板状低阻体模型,巷道电阻率 $\rho_{\text{h}} = 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_{\text{L}} = 1 \Omega \cdot \text{m}$,异常体尺寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,板状体异常体垂直于巷道正前方,中心距巷道掘进工作面 60 m,供电电流 1 A。其他参数同体状低阻异常体模型,模型示意如图 10 所示。

取传统超前探测观测系统下 1 号电极供电和“三角锥”型观测系统下 32 号电极供电时,各接收电极的电压值,比较背景和加板状异常条件下电压响应及其变化量 ΔU ,如图 11 所示。

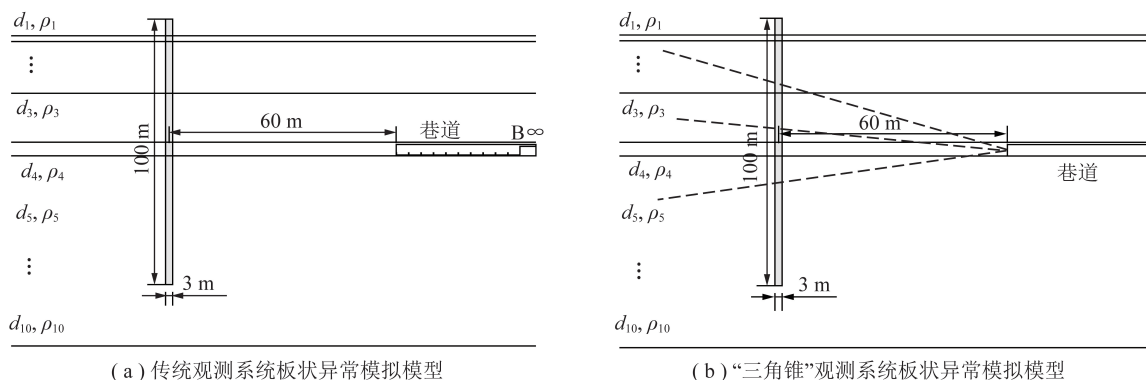


图 10 层状模型下 2 种观测系统对板状低阻异常的正演模型

Fig.10 Forward modeling of plate-like low-resistivity anomalies by two observation systems under the layered model

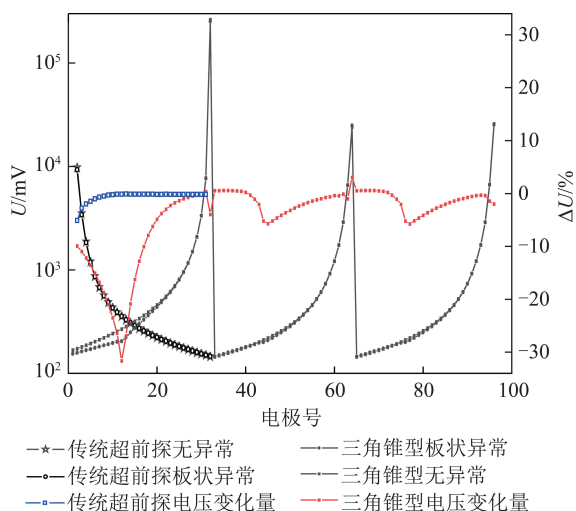


图 11 层状模型下 2 种观测系统对板状低阻异常电压响应对比

Fig.11 Comparison of response of two observation systems to tabular low resistance abnormal voltage under layered model

传统超前探在掘进工作面 1 号电极供电时, 2~32 号电极处电压逐渐降低, 加板状异常后的电压曲线与背景相比变化较小, 电压变化量在 2.8% 以内。“三角锥”型观测系统在掘进工作面 32 号电极供电时, 1~31 号电极方向, 33~64 号电极方向及 65~96 号电极方向电位逐渐升高, 加板状异常后的电压曲线与背景相比在 44, 48 和 48 m (12 号、45 号、77 号电极) 处变化最大, 电压变化量在 44 m (12 号电极) 处最高达 31.6%。

3.3 “三角锥”型观测系统对低阻异常的空间定位

陈明生等^[31]设计了多条单极-偶极二维观测剖面, 以点电极源为圆心, 以发生电位异常位置到电流源的距离为半径画弧, 采用弧线交汇技术成功探测到二维孤立地质异常体的位置。在全空间条件下, 点电源 A 周围形成以 A 为中心的球等位面。当“三角锥”型观测系统中间有异常体时, 这样的三维空间排列有

利于采用弧线交汇技术实现异常体的定位。

如图 4 均质模型下“三角锥”型观测系统对体状异常响应可见, 体状低阻体引起 3 个钻孔中分别出现 1 个正向和 1 个负向变化极值点, 电位变化零点分别位于 16 号、48 号、80 号电极附近, 距孔口的直线距离均为 60 m, 以此电位变化零点为特征点利用交汇法作图: 以孔口 1 号电极为中心, 沿 3 个钻孔方向分别以 60 m 为半径画圆, 3 个圆面交会于三角锥中心线 60 m 处, 即所设置模型低阻异常的正中心 (图 12), 弧线交汇技术定位三维孤立地质异常体位置也很有效。

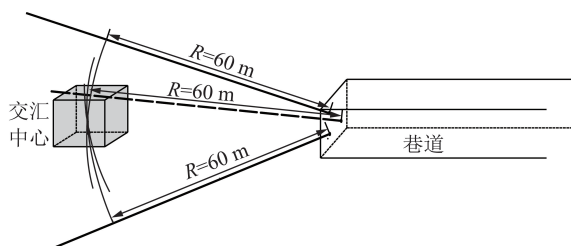


图 12 均质全空间条件下“三角锥”型观测系统对体状异常的交汇作图结果

Fig.12 Results of intersection of body anomalies by “triangular cone” observation system under homogeneous whole space condition

均质模型下“三角锥”型观测系统对板状异常模拟响应结果 (图 6) 中, 异常距点电源 64 m, 基本是钻孔穿过异常体的位置, 可用于板体异常的定位。进一步分析层状介质中 2 种模型的模拟结果 (图 11), 响应特征比较复杂, 特征点规律不明显, 难于用弧线交汇技术进行异常体的准确定位, 必须通过电阻率三维反演技术才可能实现异常体的准确定位和形态刻画。

3.4 小 结

在均质全空间模型条件下和层状模型条件下, 进行 2 种观测系统对同一体状低阻异常和板状低阻异常的响应特征比较, 正演结果异常响应值见表 2。

表 2 正演模拟结果异常幅值

Table 2 Summary of abnormal amplitude of forward simulation results

模型	异常形式	$U_{\max}/\%$	
		传统	三角锥
均质模型	体状低阻异常	0.120	2.7
	板状低阻异常	0.200	23.4
层状模型	体状低阻异常	0.045	7.8
	板状低阻异常	2.800	31.6

由表 2 可见,在均质模型下,传统直流电法超前探观测系统对体状低阻异常和板状低阻异常的响应基本相当;在层状模型中,对板状异常的响应比体状异常大几十倍。而“三角锥”型观测系统在均质和层状模型中对板状异常的响应是体状异常响应的数倍。可见,“三角锥”型观测系统对异常的响应比传统超前探观测系统更强,且对低阻模型产生的响应是传统超前探观测系统的数十倍甚至数百倍。通过异常交汇法作图即可对均质模型下的简单地质异常进行定位,对复杂模型和层状模型的异常精确定位和形态刻画还需通过电阻率三维反演解决。

4 结 论

(1)设计 3 个钻孔间互成 28°的角度,形成直流电法超前探三维观测系统,通过异常交汇法作图即可对均质模型下的简单地质异常进行定位,解决了传统直流电法超前探测无法确定具体位置的问题,但对复杂形态和层状模型的异常精确定位和形态刻画还需通过电阻率三维反演的方法确定。

(2)“三角锥”型观测系统对体状低阻异常和板状低阻异常的响应,均比传统超前探测观测系统强一个甚至是 2 个数量级,因此“三角锥”型观测系统更有利于获取前方的异常信号并进行处理成像。

(3)“三角锥”型超前探测的观测系统可获得前方异常体的三维响应,传统直流电法超前探测问题将转变成全空间三维反演问题,规避了目前传统巷道直流电法超前探测存在的障碍,为超前探测提供了一个新的解决方法。

参考文献(References):

[1] 袁亮.我国煤矿安全发展战略研究[J].中国煤炭,2021,47(6): 1-6.
YUAN Liang. Study on the development strategy of coal mine safety in China[J]. China Coal,2021,47(6): 1-6.

[2] 彭苏萍.我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J].煤炭学报,2020,45(7):2331-2345.

PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(7):2331-2345.

[3] 张平松,欧元超,李圣林.我国矿井物探技术及装备的发展现状与思考[J].煤炭科学技术,2021,49(7):1-15.
ZHANG Pingsong,OU Yuanchao,LI Shenglin. Development quo-status and thinking of mine geophysical prospecting technology and equipment in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(7):1-15.

[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] 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.

[7] 王运彬,于师建.孔内直流电法超前探测正演模拟研究[J].煤炭技术,2017,36(3):146-149.
WANG Yunbin,YU Shijian. Direct current method forward modeling research of advanced detection in hole[J]. Coal Technology,2017, 36(3):146-149.

[8] 岳建华,杨海燕,苏本玉,等.矿井张量电阻率法理论基础研究[J].煤炭学报,2020,45(7):2464-2471.
YUE Jianhua,YANG Haiyan,SU Benyu,et al.Theoretical foundation of tensor measurement for mine resistivity method[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(7):2464-2471.

[9] 刘树才,岳建华,李志聃.矿井电测深理论曲线变化规律研究[J].中国矿业大学学报,1996,25(3):101-105.
LIU Shucai,YUE Jianhua,LI Zhidan. Studies on changing law of Theoretical electrical sounding curves in coal mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology,1996,25(3):101-105.

[10] 黄俊革,阮百尧,王家林.坑道直流电阻率法超前探测的快速反演[J].地球物理学报,2007,50(2):619-624.
HUANG Junge,RUAN Baiyao,WANG Jialin.The fast inversion for advanced detection using DC resistivity in tunnel[J]. Chinese Journal of Geological,2007,50(2):619-624.

[11] 黄俊革,鲍光淑,阮百尧.坑道直流电阻率测深异常研究[J].地球物理学报,2005,48(1):222-228.
HUANG Junge,BAO Guangshu,RUAN Baiyao. A study on anomalous bodies of DC resistivity sounding in tunnel[J]. Chinese Journal of Geological,2005,48(1):222-228.

[12] 岳建华,李志聃.矿井直流电法勘探中的巷道影响[J].煤炭学报,1999,24(1):9-12.
YUE Jianhua,LI Zhidan. Roadway influence on electrical prospecting in underground mine[J]. Journal of China Coal Society,1999,

- 24(1):9-12.
- [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.
MA Bingzhen, LI Xiu. Roadway influences on advanced DC detection in underground mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(1):78-81.
- [14] 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.
SHI Xuefeng. Numerical simulation of influencing factors in advance DC electric detection in coal mines[J]. Coal Technology, 2016, 35(11):122-124.
- [15] 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.
LU Jingjin, WU Xiaoping. 3D numerical modeling of tunnel DC resistivity for in advance detection[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(6):83-86.
- [16] 张森森,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.
ZHANG Miaomiao, SHI Xianxin. Analysis of anomalous bodies in different spatial orientations by direct current resistivity method[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2):481-487.
- [17] 刘斌,李术才,李树忱,等.隧道含水构造直流电阻率法超前探测研究[J].岩土力学,2009,30(10):3093-3101.
LIU Bin, LI Shucui, LI Shuchen, et al. Study of advanced detection of water-bearing geological structures with DC resistivity method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10):3093-3101.
- [18] 胡雄武,张平松,吴荣新,等.矿井多极供电电阻率法超前探测技术研究[J].地球物理学进展,2010,25(5):1709-1715.
HU Xiongwu, ZHANG Pingsong, WU Rongxin, et al. Study on the advanced detection technique by multi-electrode direct current resistivity in mines[J]. Progress in Geophys, 2010, 25(5):1709-1715.
- [19] GAO W, SHI L, ZHAI P. Water detection within the working face of an underground coal mine using 3D electric resistivity tomography (ERT)[J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 2019, 24(3):497-505.
- [20] HU Daiming, TEZKAN Bülent, YUE Mingxin, et al. Prediction of conductive anomalies ahead of the tunnel by the 3D-resistivity forward modeling in the whole space[J]. Geofluids, 2021, 2021:7301311.
- [21] 程久龙,李飞,彭苏萍,等.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,2014,39(8):1742-1750.
CHENG Jiulong, LI Fei, PENG Suping, et al. Research progress and development direction on advanced detection in mine roadway working face using geophysical methods[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8):1742-1750.
- [22] 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,2006,45(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.
- [23] 韩光,庄德玉,田劫,等.矿井直流电法超前预报球体构造的初步理论及沙槽实验研究[J].煤炭工程,2009(3):69-72.
HAN Guang, ZHUANG Deyu, TIAN Jie, et al. Primary theory on the mine direct current method to pilot predict sphere structure and study on san trough simulation experiment[J]. Coal Engineering, 2009(3):69-72.
- [24] 刘洋,吴小平.巷道超前探测的并行 Monte Carlo 方法及电阻率各向异性影响[J].地球物理学报,2016,59(11):4297-4309.
LIU Yang, WU Xiaoping. Parallel Monte Carlo method for advanced detection in tunnel incorporating anisotropic resistivity effect[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(11):4297-4309.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 吴小平,徐果明,李时灿.利用不完全 Cholesky 共轭梯度法求解点源三维地电场[J].地球物理学报,1998,41(6):848-855.
WU Xiaoping, XU Guoming, LI Shican. The calculation of three-dimensional geoelectric field of point source by incomplete Cholesky conjugate gradient method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1998, 41(6):848-855.
- [28] STÜBEN K. A review of algebraic multigrid[J]. J Comput Appl Math, 2001, 128(1/2):281-309.
- [29] LU J J, WU X P, SPITZER K. Algebraic multigrid method for 3D DC resistivity modeling[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(3):700-707.
- [30] 李宏泽,赵磊,周官群,等.口孜东矿5煤物性特征和直流电法超前探测低阻阈值的确定[J].中国煤炭地质,2021,33(10):155-161.
LI Hongze, ZHAO Lei, ZHOU Guanqun, et al. Coal No.5 physical property features and low-resistivity threshold value determination through direct current prospecting advanced detection in Kouzidong Coalmine[J]. Coal Geology of China, 2021, 33(10):155-161.
- [31] 陈明生,闫述,陆俊良,等.二维高分辨自动地电阻率探测地下洞穴技术[J].煤田地质与勘探,1995,23(3):45-50.
CHEN Mingsheng, YAN Shu, LU Junliang, et al. Two-dimensional high-resolution automatic earth resistivity detection technology for underground caves[J]. Coalfield Geology and Exploration, 1995, 23(3):45-50.