# 煤层底板油型气涌出危险性超前探测技术

摘要：煤油气共生矿井中底板油型气灾害发生频繁，为探测得出底板油型气涌出危险性，本文以含油型气岩层的电性特征表现为基础利用电法探测技术来获取底板的电阻率分布，基于此视电阻率数据来提出一种电法指标变异系数计算方法对油型气涌出危险性进行评估，之后通过数值模拟的方法模拟底板油型气涌出，将模拟过程中不同参数下计算得出的电法指标变异系数作为输入量，涌出量作为输出量通过[经遗传算法优化的反向传播神经网络算法](http://www.baidu.com/link?url=7MufmZgJaCQVM8Pc-oXCm296v0ZFo-rpjh5sw5pktiSrwyS63FiVcCvcwkitwTJ-ado6gqZrbo_bLRQnY7Uhke_Ivc_mQbxt2-ATYrioj1O)(GA-BP)进行训练学习得到预测模型。采用该方法对实地巷道底板进行电法探测来对掘进巷道前方油型气涌出危险性进行预测分析并与统计法得到的油型气赋存定性结果相比较，结果表明电法指标变异系数与统计定性分析结果相吻合，根据巷道不同位置油型气的涌出危险性提出相应的治理方案保证煤矿的安全生产工作顺利进行。

关 键 词：油型气；超前探测；机器学习；危险性预测

Advanced detection technology for the emission risk of oil-type gas out of the coal seam floor

**Abstract:** Floor oil-type gas disasters frequently occur in coal-oil-gas coexistence mines. In order to detect the risk of floor oil-type gas gushing, this paper uses electrical detection technology to obtain the floor resistivity based on the electrical characteristics of oil-type gas-bearing rock formations. distribution, based on the apparent resistivity data, a calculation method for the coefficient of variation of the electrical index is proposed to evaluate the risk of oil-type gas gushing out, and then the oil-type gas gushing out of the bottom plate is simulated by numerical simulation, and the different parameters in the simulation process are The coefficient of variation of the electrical method index calculated below is used as the input quantity, and the gushing quantity is taken as the output quantity, and the prediction model is obtained by training and learning through the backpropagation neural network algorithm (GA-BP) optimized by the genetic algorithm. Using this method to conduct electrical detection on the roadway floor in the field to predict and analyze the risk of oil-type gas gushing in front of the tunnel, and compare it with the qualitative results of oil-type gas occurrence obtained by the statistical method, the results show that the coefficient of variation of the electrical method index and The statistical and qualitative analysis are consistent, and finally according to the risk of oil-type gas gushing in different positions of the roadway, the corresponding control plan is put forward to ensure the safe production of the coal mine goes smoothly.

**Key words:** oil-type gas; advanced detection; machine learning; risk prediction

巷道掘进过程中会造成底板卸压，底板下赋存的油型气受采动卸压影响发生异常涌出导致工作面瓦斯超限，所以提前对底板油型气危险性做好预报工作对煤矿安全生产尤为重要。目前矿井巷道掘进超前探测分为钻孔探测和地球物理探测，但钻探方法范围小、耗时长、试错成本高，无法满足大范围区域内储气层探测的需要[1]。地球物理的探测方法主要分为基于岩石弹性力学发射地震波反射的地震波法超前探测技术、基于地质体电性差异高密度直流电法勘探的电法超前探测技术和一些其他的超前探测技术如红外探测技术、微重力法及电磁辐射法[2]。出于不同的探测目标，不同的物探方法受到的影响也各不相同导致矿井下对于煤层内部构造及采煤工作面底板异常体的探测各有优劣，其中地震波法超前探测常用于探测前方的地质构造，而相比与震波法，电法勘探对于含水、含气地质体的响应更加敏感，也是掘进巷道超前预测预报的主要技术手段[3-7]。岳建华等[8-9]利用电法探测技术对煤层底板突水进行预测，并分别对巷道底板电测深法、矿井电剖面以及高密度电阻率法进行处理比较。并通过多极矩偶极剖面法干扰实验提出了针对非地质因素电性干扰的解决办法。罗安清[10]针对直流电法和瞬变电磁两种物探手段的不足，提出使用两种物探手段同时探测，并互相验证探测结果来提高探测的精度。高卫富[11]通过ANSYS构建岩层异常体模型，利用正演模拟直流电法探测过程，结果表明直流电法能够精准的探测得地质异常体位置。

直流电阻率法探测技术在应用过程中对各种干扰的研究与探讨已经越来越深入，对实际数据的采集和基于采集数据的反演计算越来越精准，地质异常体位置的获取更加可靠。但对于地层中存在的油型气区域，超前探测技术只能识别可能有油型气存在的地质体异常位置却无法通过位置对油型气涌出危险性进行进一步判断，依据含油型气岩体应力状态所对应的电位信号分布[12]本文提出一种基于直流电阻率超前探测法的电法变异系数计算方法作为电法评价指标评估油型气的涌出危险性，通过数值模拟得到油型气涌出量和相应地址参数计算得的电法评价指标作为训练数据得到单因素预测模型，结合实地巷道测量得到的电法数据作为输入量对油型气涌出量进行分析预测提出相应的油型气治理方案以保证煤矿安全开采的有效实施。

1 超前探测

1.1 超前探测基本原理

在均匀介质条件下，通过使电极与底板岩石密切接触并布置测线连接所有电极，由供电电极发射电流，通过单个电极所产生的电源场形成的电位面差变化来计算视电阻率作为球面内的地质体异常的综合反映电性参数[13]。在巷道中设置A、B极为供电电极，N极为公共电极，其中A为可移动电极，B极为固定电极设置在“无穷远” 位置，共布置48个间距为1.5 m的电极的观测系统1(a)并轮流将每个电极作为供电电极发射电流进行数据采集。在该观测系统下以供电电极为点电源形成稳定的球形电场，当供电电极发射电流时其余测量电极同步采集电位，采用不同供电电极与测量电极的组合将会形成多个不同半径的探测球面如图1(b)所示，并得到大量的电流电位数据来计算电阻率突出前方地质体的响应特征。



（a）直流电法观测系统布置



（b）网格搜索示意图

图1 直流电法多级供电底板探测示意图

Fig.1 Schematic diagram of DC multi-stage power supply

1.2 数据预处理

1.2.1 垂直叠加计算

由于现场环境复杂，实际数据采集过程中不止会受到掘进前方电性异常影响，同时受到巷道空腔影响[14]故为减少误差计算每一个供电电极在每一个观测点视电阻率值时，为最大程度减小电极M、N附近的影响，所有对同一供电点不同测量电极M、N下测得的视电阻率进行加权处理。具体方法为将M、N中点O为观测点，利用不同的测量电极对观测点O进行电阻值的计算，每移动一次测量电极观测点O处的电阻值为：

(1)

其中*i*为第*i*个供电电极，*j*为MN移动次数,*k*为装置系数：

(2)

将其测量的MN为厚度的球壳作为加权因子,：

(3)

最终该观测点球面所代表的视电阻率计算如下式：

(4)



图2 垂直叠加计算示意图

Fig.2 Schematic diagram of vertical superposition calculate

1.2.2 偏移叠加计算

为方便直观反映迎头前方电性异常情况以及网格算法的最佳效率，根据每个网格测量的视电阻率期望来确定该网格的有效电阻率[15]，依据测线电极之间的间距为长度对网格进行划分，对于每个网格选取两个参考点坐标P1(X1,Y1),P2(X2,Y2),其中点P1(X1，Y1)代表网格距离供电电极A最近的点，点P2(X2,Y2)代表网格距离最远的点。所以每个网格的赋值条件：

(5)

其中*i*为供电电极*Ai*的坐标(*i*，0)，*p*为该视电阻率对应圆弧的半径。以供电电极A到测量电极M、N的中点O的距离为R为半径的圆经过的网格，对于不同的供电电极和测量电极得到的则将该电阻率赋给该单元格，如图3所示对于网格1有、，网格2有、，网格3有，网格4有。



图3 偏移叠加计算示意图

Fig.3 Schematic diagram of migration superposition calculation

1.2.3 单元网格视电阻率计算

而球面族之间根据所划分的网格将会在多个同一网格形成交叉，导致部分网格单元存在多个电阻率值，多个视电阻率值将视为该网格单元体的多次观测样本，最后定义样本的期望为该单元体内的视电阻率值，设经过每个单元格的圆弧个数为*k*，则单元视电阻率为：

(6)

由于不同圆弧的覆盖局限性导致存在部分网格单元没有圆弧经过，为保持数据的连续性所以对没有圆弧经过的网格单元采用插值处理，这里插值的方法采用KNN(K-Nearest Neighbor)的机器学习算法，原理是利用待插值单元附近的*k*个最近邻近数据，将这些邻近单元的平均值赋予代插值单元。

完善底板的电阻率数据后依据底板每一层电阻率数据的不均匀度提出单层电法指标变异系数*Ui*作为岩层的电法评价指标，通过每一层电阻率值*Xij*进行计算，为突出电位异常增加了集中系数z，以集中系数为范围每*m*号网格周围*n*号网格做一次计算后取均值具体计算过程如下：

(7)

式中*max*为最大计算次数；*i*为电法探测探测的最大有效深度网格数；*j*电法探测探测的最远有效距离网格数；z为集中系数，经测试z取4-6为最佳值。

最后定义电法评价指标*U*为所有单层电法指标变异系数的和：

(8)

2 油型气涌出危险性预测

2.1 基于GA-BP网络的智能预测方法

（1）GA-BP网络简介

GA-BP网络又名遗传算法改进的反向传播神经网络，主要由两部分构成，其中GA为遗传算法，是一种寻优算法，其主要原理将问题的每个解编码为个体，解的集合构成种群，通过对个体的评估给出单个个体的适应度值，基于该适应度，经过选择、交叉和变异操作将适应度值高的个体替换低的个体形成新一代的种群，在不断重复以上操作的过程中问题逐步朝最优解的方向进化，因此遗传算法可以看作由可行解组成的种群不断进化的过程；BP是反向传播神经网络的简称，也是学习过程中的主要框架，其中主要由输入层、隐含层和输出层三部分构成，通过输入层节点输入学习样本，前向计算获得输出值与实际值作比较，再将误差反向转播给各个节点，对相关参数进行调整，再利用新参数前向计算，以此往复直至输出值与实际值误差到达最小，便可认为取得最可靠的模型[16]。但BP神经网络初始权值和阈值无法确定，所以加入遗传算法提高计算效率与精度。

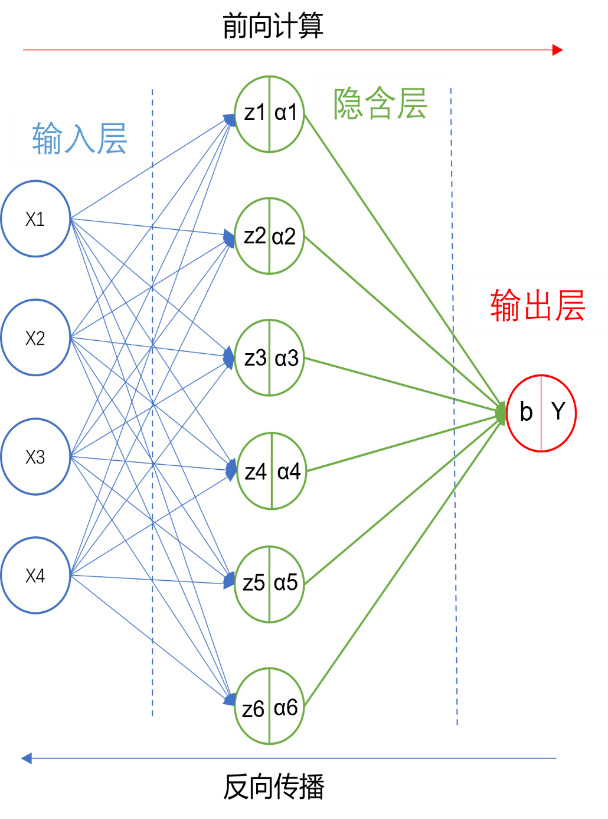


图4 BP神经网络原理图

Fig.4 Schematic diagram of BP neural network

通过遗传算法的全局寻优能力获得最优的BP网络的初始权值和阈值，将寻优算法获得的最优初始权值和阈值作为BP神经网络的初始权值和阈值，然后进行训练以避免陷入局部最小值。遗传算法改进后的BP神经网络权值不是随机产生的，而是遗传算法寻优模块获得的[17-20]。BP算法中的初始权值和阈值作为遗传算法个体的基因值，个体长度即为BP神经网络中权值和阈值的个数，每个基因即代表一个权值或阈值，基因上的数值就是BP神经网络中连接权值或阈值的真实值，如此便组成了遗传算法中的一个染色体。一定数量的染色体作为遗传算法训练的初始种群，再经过遗传算法的选择运算、交叉运算、变异运算等迭代过程后获得一个最优个体，然后以最优个体作为BP网络的初始参数进行训练。



图5 GA-BP网络算法流程图

Fig.5 Flow chart of GA-BP network algorithm

（2）模拟学习

构建巷道板油型气涌出模型通过组合底板岩层厚度、渗透率及地址构造等三个变量因素进行数值模拟得到油型气涌出量以及其不同变量下相对应计算得出的电法指标变异系数作为学习样本，数据列表如下：

表1 实测结果训练表

Table 1 Training table of results

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 电法评价指标 |  | 涌出量/(m3·min-1) |
| 0.26 |  | 0.265 |
| 0.42 |  | 0.531 |
| 0.58 |  | 1.080 |
| 0.16 |  | 0.264 |
| 0.31 |  | 0.532 |
| 0.47 |  | 0.108 |
| 0.20 |  | 1.180 |
| 0.30 |  | 1.770 |
| 0.41 |  | 3.530 |
| 0.11 |  | 0.527 |
| 0.21 |  | 1.480 |
| 0.30 |  | 3.530 |
| 0.18 |  | 0.128 |
| 0.24 |  | 0.448 |
| 0.31 |  | 1.080 |
| 0.08 |  | 0.128 |
| 0.15 |  | 0.446 |
| 0.22 |  | 1.080 |
| 0.15 |  | 0.075 |
| 0.21 |  | 0.415 |
| 0.26 |  | 1.040 |
| 0.05 |  | 0.075 |
| 0.19 |  | 0.414 |
| 0.16 |  | 1.060 |

通过随机打乱排序的方法，将其中2/3的数据作为训练集，1/3的数据作为验证集。将训练集中电法评价指标作为输入量，油型气涌出量作为输出量进行学习训练得到模型后，将验证集中电法评价指标作为输入量得到预测涌出量输出量并与验证集实际涌出量作比较，以此验证模型的好坏。

（3）预测分析

GA-BP算法分别使用BP神经网络和经遗传算法优化的BP神经网络对训练数据的学习，经过50次的迭代计算，两种网络模型训练误差下降情况如图6所示，训练模型误差不断下降并最终收敛达到最小值，显然遗传算法具有一定优化能力使得初始误差值减小。再将验证集中的输入值放入训练好的模型中进行计算，得到两种模型得到的输出值与真实值之间的差距如图7所示。结果表明预测值与真实值之间存在一定的误差，但整体趋势可以看出模型还是能够较好的预测出测试集中的油型气涌出量。



图6 GA-BP网络误差变化图

Fig.6 GA-BP network error change



图7 预测值与真实值比较图

Fig.7 Comparison of predicted value and true value

3 油型气涌出危险评价指标现场验证

3.1 现场评价指标计算

下表为黄陵2号煤矿二盘区215巷道280 m处布置48个电极所采集到的原始数据部分展示。每次采集数据使用不同的电极作为供电电极，其电压为0 V，其余电极接受电位信号作为测量电极，且越靠近供电电极，电流场密度越大，所以离供电电极越近的电极电位越高。

表2 部分电流与各电极电压值

Table 2 Partial values of current and voltage of each electrode

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 电流/mA | 电压1/mV | 电压2/mV | … | | 电压48/mV |
| 56.22 | 0 | 148.80 | … | -3.20 | |
| 100.72 | 269.44 | 0 | … | -3.26 | |
| 90.85 | 75.67 | 220.33 | … | -1.95 | |
| 104.84 | 43.70 | 95.24 | … | -1.57 | |
| 116.75 | 26.69 | 45.45 | … | -0.81 | |
| 116.90 | 18.03 | 25.30 | … | -0.37 | |
| 116.41 | 14.01 | 17.55 | … | -0.18 | |

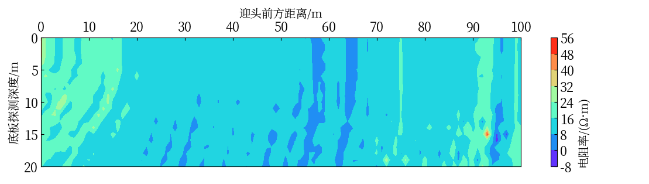
对原始数据进行异常值剔除后由式（1）-（6）进行计算后得到网格化的电阻率值并对空值进行填充后后得到的结果部分展示如下表所示：

表3 部分网格数据值

Table 3 Partial values of grid data

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 电阻0/(Ω·m) | 电阻1/(Ω·m) | 电阻2/(Ω·m) | 电阻3/(Ω·m) | 电阻4/(Ω·m) | 电阻5/(Ω·m) |
| 71.62 | 132.42 | 132.42 | 74.91 | 273.60 | 194.68 |
| 71.62 | 132.42 | 132.42 | 276.97 | 273.60 | 194.68 |
| 71.62 | 132.42 | 132.42 | 276.97 | 273.60 | 194.68 |
| 71.62 | 132.42 | 132.42 | 291.05 | 273.60 | 194.68 |
| 178.17 | 147.62 | 132.96 | 273.60 | 394.56 | 178.89 |
| 154.62 | 144.84 | 273.60 | 394.56 | 213.96 | 94.737 |
| 172.82 | 245.57 | 205.89 | 515.53 | 150.53 | 126.29 |

从图8显示的电阻率分布结果来看距离迎头前方18 m内都呈现相对较高的电阻率值，这是由于采动影响导致迎头前方岩体破碎引起观测电阻率值偏高，后面20-70 m处岩层分布相对较平稳、岩层起伏小处于原岩应力区，表现为阻值较低。70 m以后电阻率分布不均匀、高低阻交替波动幅度较大且有电阻率异常偏高的点，推测有地质构造、油型气的存在。



(a) 215巷道280 m超前探测电阻分布云图



(b)215巷道超前探测电阻分布变化曲线图

图8 215巷道280 m处超前探测图

Fig.8 215 Roadway advanced detection map

3.2 油型气涌出危险性精准定量预测分析

根据215巷道不同位置采集的电法数据采用式7、8计算得到相应电法评价指标，把变异系数作为预测模型的输入量得到预测的涌出量值，经整理可得表4:

表4 直流电法探测评价指标

Table 4 Evaluation index of direct current method detection

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 测量地点/m | 电法评价指标 | 预测涌出量/(m3·min-1) |
| 215巷道270 | 0.18 | 0.095 |
| 215巷道280 | 0.56 | 0.186 |
| 215巷道290 | 0.18 | 0.095 |
| 215巷道1400 | 0.18 | 0.051 |
| 215巷道1800 | 0.39 | 0.100 |
| 215巷道3000 | 0.30 | 0.117 |
| 215巷道3060 | 0.30 | 0.117 |
| 215巷道3090 | 0.30 | 0.315 |
| 215巷道3130 | 0.49 | 0.358 |
| 215巷道3300 | 0.31 | 0.325 |
| 215巷道3500 | 0.54 | 0.367 |

由电法探测结果计算出油型气涌出危险评价指标可以看出215巷道差别较大，280 m区域有异常区域但前后方都较稳定。1400 m区域风险较低，油型气涌出量小。3000 m区域附近指标较高，底板评价较差，油型气涌出量高。

通过统计法对215巷道油型气赋存概况进行定性评价，统计分析临近已采工作面205、207、209工作面和已经准备就绪的211工作面地质资料和油型气富集区状况，根据已采工作面底板油型气赋存情况将油型气分布分为3类：无油型气赋存、低油型气赋存和高油型气赋存，结合电法探测计算结果和预测油型气涌出量绘制的215工作面油型气情况如图9所示。统计分析结果仅定性表示了油型气赋存概况，没有定量结果，无法精准预测油型气赋存情况，结合本文油型气涌出危险性探测技术可以看出直流电法预测结果基本趋势与统计法结果基本一致，但更精细、精密的获得了局部危险性的异常规律。在215巷道280 m位置的断层处，油型气涌出危险性指标较高，达到了0.56，另一测点在1500 m位置，计算的危险性较低。在超过2000 m以后的测点危险性均较高，均已超过0.3，结果表明这些区域巷道底板不稳定，存在地质构造，油型气涌出危险性高。



图9 215油型气涌出危险性预测分布趋势

Fig.9 Prediction and distribution trend of gas emission risk in 215 roadway

3.3 油型气治理方案

由于215巷道探测点较多，距离较远，所以探测的结果差别大，油型气危险性分布存在明显区域特征，500m前存在一定涌出的危险性，在1500 m区域危险性较小，超过2000 m后危险性逐渐增加，因此可以根据底板油型气的危险性区域分布规律制定钻孔的优化方案。在底板油型气危险性较小区域减少钻孔数量，而在2000 m以后区域可以增加钻孔数量，提高安全性。制定的钻孔参数方案如下表所示：

表5 215巷道500 m前底板钻孔参数方案

Table 5 Parameter scheme of floor drilling before 500 m in 215 roadway

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 夹角/° | 倾角/m | 斜长/m | 平距/m |
| 1 | -7 | -11 | 51 | 10 |
| 2 | -6 | -9 | 61 |
| 3 | -5 | -9 | 71 |
| 4 | -4 | -8 | 81 |
| 5 | -6 | -7 | 91 |

表6 215巷道1500 m底板钻孔参数方案

Table 6 Parameter scheme of 1500 m floor drilling in 215 roadway

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 夹角/° | 倾角/m | 斜长/m | 平距/m |
| 1 | -5 | -9 | 71 | 15 |
| 2 | -4 | -8 | 86 |
| 3 | -2 | -7 | 101 |

表7 215巷道2000 m后底板钻孔参数方案

Table 7 Parameter scheme of floor drilling after 2000 m in 215 roadway

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 夹角/° | 倾角/m | 斜长/m | 平距/m |
| 1 | -11 | -13 | 51 | 10 |
| 2 | -10 | -12 | 61 |
| 3 | -8 | -11 | 71 |
| 4 | -7 | -9 | 81 |
| 5 | -5 | -9 | 91 |
| 6 | -4 | -8 | 101 |
| 7 | -2 | -7 | 111 |

4 结论

本文通过超前探测方法直流电法探测巷道地板岩层电性数据，结合垂直叠加等数据处理方法降低巷道内各类非电性因素干扰，通过建立地质电性球壳模型计算得到巷道底板及前方电阻率网格数据，并将结果通过曲线图及云图形式表现出来，其结果表明电法超前探测能比较好的反应实际地质的电性变化趋势。不同于其他研究仅仅局限于电性响应异常体位置，本文基于电法超前探测获取的整体地质电性差异提出电法变异系数作为电法评价指标对油型气涌出危险性进行定量分析。通过数值模拟建立油型气涌出模型，将电法数据计算取得的变异系数与模拟得到的油型气涌出量数据作为学习样本采用GA-BP机器学习算法对油型气涌出量进行预测，得到的模型仍存在一定误差有进一步优化的空间，但变化趋势基本一致。

最后将理论应用于现场工作面并与相邻工作面统计分析进行比对，结果表明不同巷道处底板计算得到的电法评价指标与统计法定性评价结果相吻合，最后结合电法评价指标与预测得到的油型气涌出量来针对巷道不同位置的油型气涌出危险性提出了相应的油型气治理方案来保证工作面的安全生产。

参考文献

[1] 张幼振,范涛,阚志涛,魏宏超,陈洪岩. 煤矿巷道掘进超前钻探技术应用与发展[J]. 煤田地质与勘探,2021,49(05):286-293.

Zhang Youzhen, Fan Tao, Kan Zhitao, Wei Hongchao, Chen Hongyan. Application and Development of Advanced Drilling Technology in Coal Mine Roadway [J]. Coal Geology & Exploration, 2021,49(05):286-293.

[2] 李敬鹏. 矿井地质雷达在煤矿中的应用现状分析[J]. 石化技术,2020,27(08):264+268.

Li Jingpeng. Analysis of the Application Status of Mine Geological Radar in Coal Mine[J]. Petrochemical Technology, 2020,27(08):264+268.

[3] 韩德品,吴正飞,石显新,代凤强,张振勇,石学锋. 矿井直流超前探测法及灾害性含导水构造异常特征研究[C]//.2014年中国地球科学联合学术年会——专题22：煤炭资源与矿山安全勘查技术论文集. [出版者不详],2014:30-33

Han Depin, Wu Zhengfei, Shi Xianxin, Dai Fengqiang, Zhang Zhenyong, Shi Xuefeng. Research on mine direct current advance detection method and anomaly characteristics of disastrous water-bearing structures[C]//.2014 China Earth Science Joint Academic Annual Conference——Special 22: Coal Resources and mine safety exploration technology collection. [Publisher unknown], 2014:30-33

[4] 胡国泽,滕吉文,皮娇龙,王伟,乔勇虎. 井下槽波地震勘探——预防煤矿灾害的一种地球物理方法[J]. 地球物理学进展,2013,28(01):439-451.

Hu Guoze, Teng Jiwen, Pi Jiaolong, Wang Wei, Qiao Yonghu. Underground channel wave seismic exploration—a geophysical method for coal mine disaster prevention[J]. Advances in Geophysics, 2013,28(01):439- 451.

[5] 胡雄武,张平松,吴荣新,郭立全,肖玉林. 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(05):1709-1715.

HU Xiongwu, ZHANG Pingsong, WU Rongxin, GUO Liquan, XIAO Yulin. Research on advanced detection technology of mine multi-pole power supply resistivity method[J]. Advances in Geophysics, 2010,25(05):1709-1715.

[6] 邱增强,刘志新. 无线电波透视法在探测隐伏导含水构造中的应用[J]. 工程地球物理学报,2005(03):185-190.

Qiu Zengqiang, Liu Zhixin. Application of radio wave perspective method in detection of concealed water-bearing structures[J]. Journal of Engineering Geophysics, 2005(03):185-190.

[7] 刘盛东,张平松. 矿井巷道超前探测技术综述[C]//.纪念矿井地质专业委员会成立二十周年暨矿井地质发展战略学术研讨会专辑,2002:58-60.

Liu Shengdong, Zhang Pingsong. A review of mine roadway advanced detection technology[C]//. Commemorating the 20th anniversary of the establishment of the Mine Geology Professional Committee and the Seminar on Mine Geology Development Strategy, 2002:58-60.

[8] 岳建华,李志聃. 矿井直流电法及在煤层底板突水探测中的应用[J]. 中国矿业大学学报,1997(01):96-100.

Yue Jianhua, Li Zhidan. Mine Direct Current Method and Its Application in Water Inrush Detection of Coal Seam Floor[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1997(01):96-100.

[9] 岳建华,李志聃. 矿井多极距偶极电剖面法及其应用[J]. 煤田地质与勘探,1994(03):47-50.

Yue Jianhua, Li Zhidan. Mine multi-pole distance dipole electric profile method and its application[J]. Coalfield Geology and Exploration, 1994(03):47-50.

[10] 罗安清. 两种物探手段在井下掘进巷道超前物探中的应用[J]. 煤炭与化工,2015,38(07):141-143.

Luo Anqing.Application of two geophysical prospecting methods in advanced geophysical prospecting of underground tunnels[J]. Coal and Chemical Industry, 2015,38(07):141-143.

[11] 高卫富,韩进,刘玉,王丹丹,李常松. 基于ANSYS全空间直流电法异常体正演模拟[J]. 地球物理学进展,2016,31(05):2089-2094.

Gao Weifu, Han Jin, Liu Yu, Wang Dandan, Li Changsong. Forward modeling of anomalous bodies based on ANSYS full-space DC method[J]. Advances in Geophysics, 2016,31(05):2089-2094.

[12] 王恩元,李忠辉,钮月,刘盛东,沈荣喜,李德行,张昕. 深部煤层采动破坏电位响应特征与分布规律[J]. 煤田地质与勘探,2021,49(01):241-248.

Wang Enyuan, Li Zhonghui, Niu Yue, Liu Shengdong, Shen Rongxi, Li Dexing, Zhang Xin. Response characteristics and distribution law of mining failure potential in deep coal seams [J]. Coalfield Geology & Exploration, 2021,49(01):241-248.

[13] 杨周,吴顺中,陈爽爽.直流电阻率法超前探测技术研究与应用[J]. 煤炭技术,2016,35(12):140-142.

Yang Zhou, Wu Shunzhong, Chen Shuangshuang. Research and Application of Advanced Detection Technology by DC Resistivity Method[J]. Coal Technology, 2016,35(12):140-142.

[14] 张力,阮百尧,刘海飞,邓小康.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(03):419-422.

Zhang Li, Ruan Baiyao, Liu Haifei, Deng Xiaokang. Numerical simulation of direct current focusing advanced detection in tunnels in three-dimensional full space[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011,35(03):419-422.

[15] 鲁晶津. 地球电磁三维数值模拟的多重网格方法及其应用研究[D]. 中国科学技术大学,2010.

Lu Jingjin. Multi-grid method and its application research on three-dimensional numerical simulation of the earth's magnetism[D]. University of Science and Technology of China, 2010.

[16] LeCun Y, Touresky D, Hinton G, et al. A theoretical framework for back-propagation[C]//Proceedings of the 1988 connectionist models summer school. 1988, 1: 21-28.

[17] Xingzheng Chen,Congbo Li,Rui Hu,Ning Liu,Chi Zhang.Integrated Optimization of Structure and Control Parameters for the Height Control System of a Vertical Spindle Cotton Picker[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering,2021,34(06):423-434.

[18] 郭昌放,武祥,杨真,陈一鼎,马留柱,马中原. 多源信息融合约束下的工作面电磁波CT 探测智能反演方法[J]. 煤炭学报,2021,46(11):3623-3635.

Guo Changfang, Wu Xiang, Yang Zhen, Chen Yiding, Ma Liuzhu, Ma Zhongyuan. Intelligent inversion method for electromagnetic wave CT detection in working face under the constraints of multi-source information fusion [J]. Journal of Coal Science, 2021,46(11):3623-3635.

[19] 程久龙,赵家宏,董毅,董倩芸. 基于LBA-BP的矿井瞬变电磁法岩层富水性的定量预测研究[J]. 煤炭学报,2020,45(01):330-337.

CHENG Jiulong, ZHAO Jiahong, DONG Yi, DONG Qianyun. Quantitative Prediction of Water Richness of Rock Formation Based on LBA-BP Transient Electromagnetic Method[J]. Journal of Coal Science, 2020,45(01):330-337.

[20] Meng J E , Fan L . Genetic Algorithms for MLP Neural Network parameters optimization[C]// 2009中国控制与决策会议论文集(3). 2009.