

# 非定向近水平钻孔轨迹参数的解算及应用

高杰<sup>1</sup>, 秦松<sup>2</sup>, 张佳乐<sup>3,4</sup>, 常乐乐<sup>4</sup>

(1. 中国矿业大学煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 西安科技大学安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 江苏东科安全研究院有限公司, 江苏 徐州 221100; 4. 中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要** 为解决目前井下瓦斯抽采短钻孔、探放水钻孔及地质勘探钻孔等非受控近水平钻孔轨迹随钻测量发展缓慢问题,开展了非定向近水平钻孔轨迹参数解算及现场应用。对近水平钻孔轨迹的5种解算方法进行对比分析,选择平均角法并植入 Visual C++ 6.0 软件,开发了随钻轨迹测量数据处理及钻孔轨迹图展示软件,研发了抗地磁场干扰的随钻测量装置。该软件通过对钻孔数据进行解算,展示了钻孔二维及三维形态轨迹图;将钻孔轨迹与矿井生产图结合,形成利于管理的轨迹跟踪底图,并根据偏差量划分出瓦斯抽采空白条带区域或勘探盲区。在贺西煤矿进行工业性试验,获取了11个钻孔的钻孔轨迹,结合工作面抽采系统图对瓦斯抽采空白条带进行分析识别,绘制了钻孔轨迹图和瓦斯抽采空白区域分布图,取得了较好的现场应用效果。

**关键词** 近水平钻孔; 随钻测量; 偏差量; 钻孔轨迹; 瓦斯抽采空白带

中图分类号 TD 712

文献标志码 A

DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2022.0528

## Calculation and application of non-directional near-horizontal borehole trajectory parameters

GAO Jie<sup>1</sup>, QIN Song<sup>2</sup>, ZHANG Jiale<sup>3,4</sup>, CHANG Lele<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Jiangsu Dongke Safety Research Institute, Xuzhou, Jiangsu 221100, China; 4. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract** In order to address the issue of accuracy deficiencies in uncontrollable borehole trajectories, including those used for gas extraction, water exploration, geological exploration, and more, calculations of the corresponding trajectory parameters were performed, followed by field application. The average angle method was implanted into Visual C++ 6.0 software based on a comparative analysis of five calculation methods for near-horizontal drilling trajectory. This helped develop software capable of processing trajectory measurement data and displaying trajectory diagrams during drilling, as well as an invention that resists geomagnetic interference during drilling. Through the calculation of borehole data, the software displayed the two-dimensional and three-dimensional morphologic trajectory diagram of

收稿日期: 2022-10-04

责任编辑: 苗青

基金项目: 国家自然科学基金项目(51874297);中国矿业大学自制实验教学仪器设备重点项目(SZZ2022Z002);中国矿业大学实验技术研究与开发重点项目(S2023D004)

作者简介: 高杰(1980—),男,河南省永城市人,博士,高级实验师,从事薄煤层可采性评价与煤炭安全绿色开采方面的研究。

通信作者: 张佳乐

E-mail: 1989673671@qq.com

Tel: 15152103753

the borehole. By integrating borehole trajectory with mine production diagram, it formed a track-tracking bottom map that can be used for management, and it divided the blank strip area or exploration blind area of gas extraction according to the deviation amount. During the industrial trial conducted in Hexi Coal Mine, 11 drilling trajectories were exhibited, and analysis and recognition of blank strips of gas extraction were also achieved by referring to the gas extraction drawing of the working face. Field application effects were achieved by mapping drilling trajectories and distributing the blank area of gas extraction.

**Key words** near-horizontal drilling; measurement while drilling; amount of deviation; drilling track; gas extraction blank zone

近年来,随钻测量技术逐渐成为煤矿井下钻孔施工的有效技术手段<sup>[1-2]</sup>,并应用于煤矿瓦斯治理、探放水及地质勘探等领域<sup>[3]</sup>。

现有的煤矿井下随钻测量技术多用于受控定向钻进中,适用于硬煤的千米定向钻机具有随钻测量功能,能够掌握钻孔的实际轨迹,但其在松软煤层中却无法有效使用,而采用普通钻机施工的钻孔长度一般不超过 150 m<sup>[4]</sup>。此外,在施工定向长钻孔的同时还需施工大量的非定向近水平短钻孔,但目前针对非定向不受控近水平短钻孔的随钻测量技术仍处于相对空白阶段,普通钻机并没有随钻测量功能,施工过程中仅能保证孔口段与设计一致,而钻孔轨迹及孔底位置则无法精准掌握,在煤层中无法形成完整的抽采通道,容易形成钻孔控制空白条带,造成安全隐患<sup>[5-6]</sup>;井下探水钻孔也存在类似问题,而且该类钻孔施工过程中受钻机性能、施钻地质条件、操作人员等多因素影响,钻孔实际施工轨迹极易偏离设计位置,严重影响探水结果的准确性<sup>[7]</sup>。

因此,亟需一种有效的非定向近水平普通短钻孔随钻测量装置与工艺,以便准确掌握钻孔轨迹,为后续煤层空白条带补打瓦斯抽采钻孔提供指导,提高矿井瓦斯灾害防治能力。同时,精确获取探放水钻孔施工的实时轨迹,可为提升井下水灾治理水平打下坚实基础。

本文调研钻孔设计人员与施工人员的实际需求,基于 Windows 系统选用 Visual C++ 6.0<sup>[8-9]</sup>开发了一套随钻轨迹测量数据处理及钻孔轨迹图展示软件。该软件实现了钻孔数据的传输解算、钻孔轨迹二维及三维显示、钻孔轨迹上图及精准找寻瓦斯抽采空白条带等功能。此外,随钻测量数据处理软件具有操作简便、功能全面及显示效果好等特点,可高效实现钻孔轨迹与矿井生产图的协同,形成利于管理的钻孔轨迹上图系统,对实际生产具有指导意义。

## 1 钻孔轨迹设计基础

### 1.1 钻孔轨迹基本参数

钻孔在空间的形态千差万别,导致钻孔钻进过程中实时获取轨迹的难度较大。非定向近水平普通钻孔轨迹测量和数据处理过程中,通常在钻孔轨迹曲线上布置尽可能多的测点,测定各测点对应的孔深、倾角和方位角 3 个基本要素值并进行反演解算,可获得钻孔轨迹。

在地理坐标系中阐述普通近水平钻孔轨迹 3 个基本要素的定义,如图 1 所示, $O$  点为开孔位置, $A$  点为钻孔轨迹上的任意一点, $N$  轴正向为地理北方向, $E$  轴正向为地理东方向, $Z(D)$  轴正向垂直向上指向大地,曲线路径  $OABC$  代表任一段钻孔空间轨迹, $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$  分别为  $A$ 、 $B$ 、 $C$  在水平面的投影。

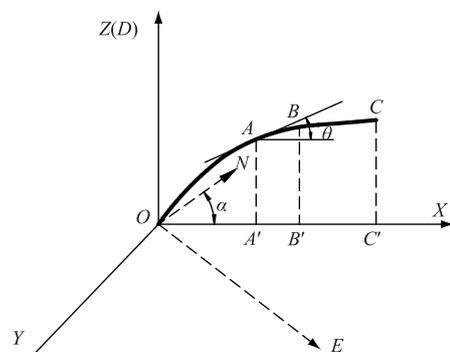


图 1 钻孔轨迹基本要素

Fig. 1 Basic elements of the borehole trajectory

描述钻孔轨迹具体各要素的规定如下:

1) 孔深,指某个测点到开孔位置的深度。在煤矿井下近水平钻孔中一般指开孔位置到测点的钻孔轴线曲线长度,通常以钻进钻孔的钻杆总长度来衡量,一般用  $L$  表示。

2) 倾角,指钻孔轨迹上某个测点沿钻进方向的切线与水平面之间的夹角(图 1 中  $\theta$ )。一般在设计井下普通近水平钻孔时需考虑煤层倾角,以避免钻进过程中遭遇煤层顶、底板。

3) 方位角,指钻孔轨迹上某个测点沿钻进方向的切线在水平面的投影线与  $N$  轴正向之间的夹角。一般设定从正北方向按顺时针旋转时方位角逐渐变大。用磁力仪测量方位角时,测得的数值为磁方位,磁方位与真方位的相互转换等效于加减一个当地的磁偏角。目前,方位角通过磁力计来获取和测量,若无特殊说明,下文所述北向均指磁北,方位角均为磁方位角。

1.2 近水平钻孔轨迹的解算方法

钻孔轨迹在空间中表现为一条方位、倾角和长度不断变化的曲线。对钻孔轨迹实际经过的每点进行描述是无法实现的,无论是定向钻孔轨迹测量还是普通近水平钻孔轨迹随钻测量,均是对等间距测点的三要素参数进行测量,将这些连续测点获得的数据连成光滑曲线来反映钻孔的实际钻进轨迹<sup>[10]</sup>。

为实现钻孔轨迹的二维或三维展示,需将测点三要素通过一定的公式及方法解算成可以在地理坐标系中用于作图的参数量<sup>[11-13]</sup>。目前,国内外常用的钻孔轨迹解算方法有 5 种。

1) 全角全距法,又称正切法。该方法将 2 个测点之间的钻孔轨迹假定成一段长度和测距相等的直线,直线的倾角和方位角与下一个测点的倾角和方位角相等,钻孔轨迹最终由一段段直线相互连接而成的折线组成,如图 2 所示。

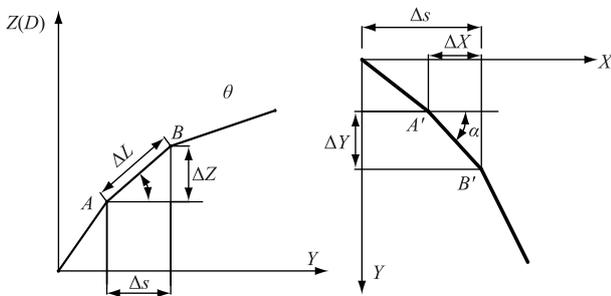


图 2 全角全距法钻孔轨迹计算图

Fig. 2 Full-angle full-distance drilling trajectory calculation

2) 均角全距法,又称平均角法。这种方法与全角全距法十分类似,唯一不同的是其假定的 2 个测点之间的直线倾角和方位角不等于下个测点的相应值,而是取前后 2 个测点倾角和方位角的平均值<sup>[14]</sup>,整个钻孔轨迹仍是一段段直线相互连接而组成的折线,如图 3 所示。

图 3 中,1 和 2 是钻孔轨迹上前后相邻的 2 个测点,1' 和 2' 是其在水平面上的投影点。按照该算法,1 和 2 点所在钻孔轴线的坐标变量计算公式为:

$$\Delta X = \Delta L \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \cos \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \quad (1)$$

$$\Delta Y = \Delta L \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \quad (2)$$

$$\Delta Z = \Delta L \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (3)$$

$$\Delta s = \Delta L \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (4)$$

根据式(1)~(4),解算钻孔轨迹方程如下:

$$X_i = \Delta L_{i-1,i} \cos \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cos \left( \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} - \lambda \right) + X_{i-1} \quad (5)$$

$$Y_i = \Delta L_{i-1,i} \cos \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin \left( \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} - \lambda \right) + Y_{i-1} \quad (6)$$

$$Z_i = \Delta L_{i-1,i} \sin \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} + Z_{i-1} \quad (7)$$

式中:  $\Delta L$  为测距;  $X_i, Y_i, Z_i$  为现测点坐标;  $X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1}$  为相邻的前个测点坐标;  $\Delta L_{i-1}$  和  $\Delta L_i$  为测点钻孔轨迹轴线长度;  $\theta_i$  为现测点倾角;  $\alpha_i$  为磁方位角;  $\lambda$  为当地磁偏角(地理坐标系时)或勘探线方位角(矿区相对坐标系时)<sup>[15]</sup>。

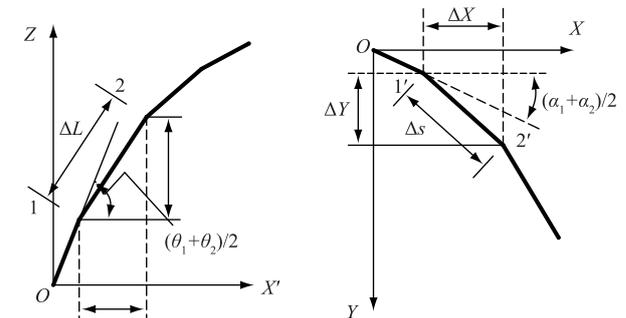


图 3 均角全距法钻孔轨迹计算图

Fig. 3 Mean angle full distance method drilling trajectory calculation diagram

3) 全角半距法,又称平衡正切法。与前 2 种方法不同,该方法假设轨迹上相邻 2 个测点之间由 2 条直线段连接而成,并且 2 段直线的倾角和方位角不同,上段直线采用前测点的倾角和方位角,后半段直线则采用后测点的倾角和方位角。对比前 2 种方法,该方法使整个钻孔轨迹由更多的折线构成,如图 4 所示。

4) 曲率半径法,又称行进曲线法。与前 3 种方法均不同的是,该方法将 2 个测点之间的轨迹假定为圆柱外表面上的一条弧线,如图 5 所示。该弧线代表的钻孔轨迹倾角和弯曲强度是固定不变的<sup>[16]</sup>,随钻轨迹是由无数条这样的圆弧组成的弧线。

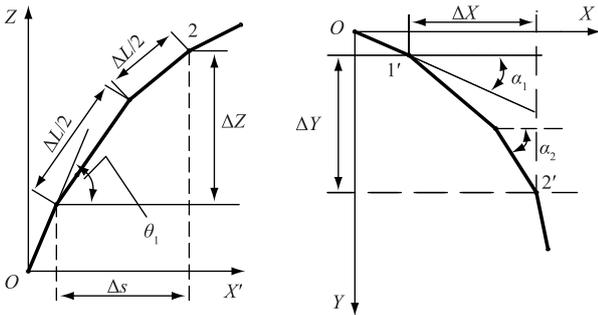


图 4 全角半距法钻孔轨迹计算图

Fig. 4 Full-width half-space drilling trajectory calculation

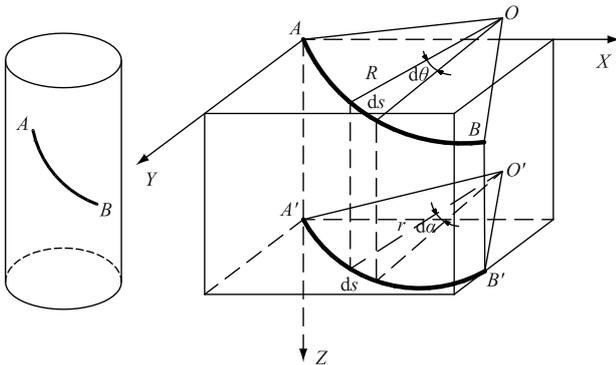


图 5 曲率半径法钻孔轨迹计算图

Fig. 5 Curvature radius method drilling trajectory calculation

5) 最小曲率法,该方法同样认为整个钻孔由一段段弧线组成,即假定相邻 2 个测点由一段弧线连接而成,且这条弧线具有最小曲率,如图 6 所示。

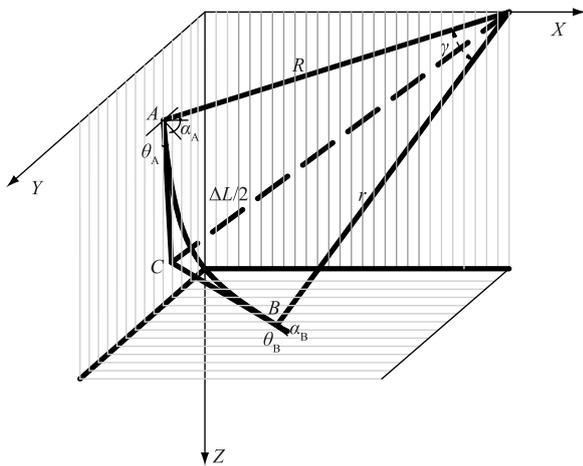


图 6 最小曲率法钻孔轨迹计算图

Fig. 6 Minimum curvature method drilling trajectory calculation diagram

根据钻孔轨迹 2 个相邻测点之间不同的形态,可以将上述 5 种计算方法分为直线法、折线法和弧线法。轨迹坐标解算方法比较如表 1 所示,其中  $K_i$  表示计算量,  $P_i$  表示计算精度。

表 1 轨迹坐标解算方法比较

Table 1 Comparison of trajectory coordinate calculation methods

类型	计算方法	模型条件	$K_i$	$P_i$
直线型	全角全距法	测点间距小	$K_1$	$P_1$
	均角全距法	测点间距小,测点多	$K_2$	$P_2$
折线型	全角半距法	测量结果平滑,曲线处理	$K_3$	$P_3$
曲线型	曲率半径法	等变螺旋线角的圆柱螺线	$K_4$	$P_4$
	最小曲率法	测点间抽象成斜面圆弧曲线	$K_5$	$P_5$

不同的轨迹解算方法其计算复杂程度和精度也不同,因此,在选择轨迹解算方法时应注意二者间的平衡。

## 2 数据处理软件的开发

### 2.1 数据处理系统设计

#### 2.1.1 软件整体设计

随钻测量系统完成钻孔轨迹测量后会产生大量的钻孔数据,随着钻孔长度的增加,测点的密集程度也增大,无法从众多数据中直接看出钻孔轨迹走向,只有将钻孔数据进行解算处理并绘制钻孔轨迹图才能应用于实际生产。因此,本文开发了随钻测量数据处理系统,软件设计功能流程如图 7 所示。

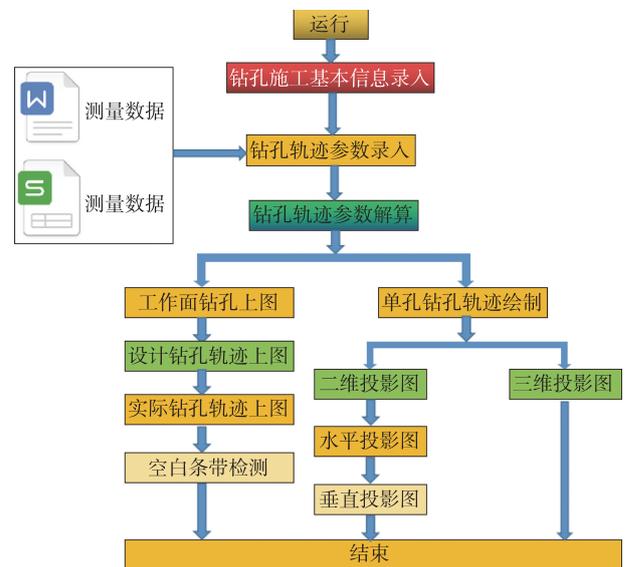


图 7 随钻轨迹测量数据处理软件设计流程

Fig. 7 Drilling trajectory measurement data processing software design process

在 Windows 环境下,对比现有的软件开发工具,选择 Visual C++ 6.0 可视化开发软件进行数据处理系统设计。1.2 节中分析比较了 5 种钻孔轨迹

解算方法,可以看出均角全距法和全角半距法较其他方法既具有较好的计算精度又能使计算不过于复杂,因此采用该算法开展软件编程。确定软件主要功能为轨迹数据处理和钻孔轨迹图形展示,并能根据钻孔实际情况随时录入新的钻孔数据,完成数据内部解算,最终获得钻孔图形轨迹。

2.1.2 随钻测量装置的结构组成

典型的随钻测量系统由地下发射部分和地面

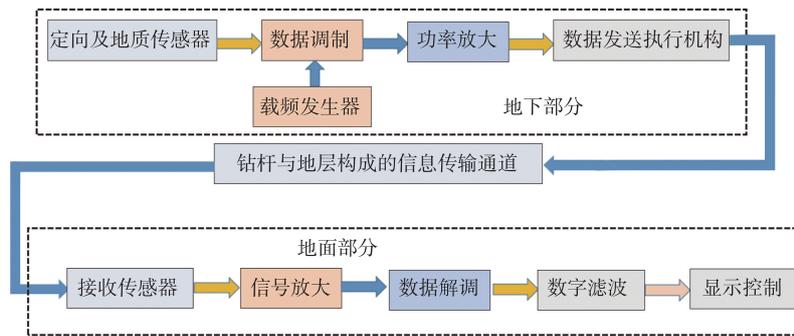


图 8 典型随钻测量系统构成图

Fig. 8 Composition diagram of a typical drilled measurement system

为准确获取钻孔轴线轨迹基本参数,一方面应确定合适的测量方法,另一方面还必须选择合适的参数传感器。轨迹测量系统由安装在不同轴线上的 3 个加速度计和 3 个磁强计构成,分别沿 3 个基本坐标轴安装,如图 9 所示。重力分量由 3 个加速度计来协同测量,测得的数据可以解算得到钻孔轨迹在该测点的倾角。地磁场分量由 3 个磁强计测量,测得的数据结合 3 个加速度计所测数据可得到钻孔轨迹在该测点的方位角<sup>[17]</sup>。

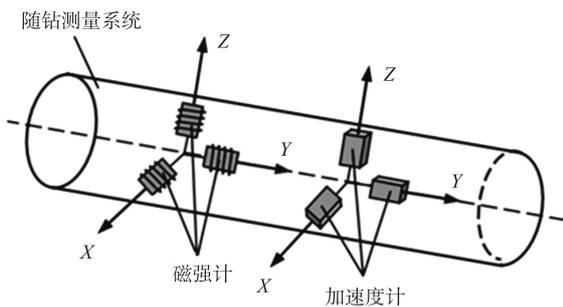


图 9 加速度计和磁强计组合的轨迹测量系统

Fig. 9 Track measurement system using a combination of accelerometer and magnetometer

为排除地磁场等各种磁场对磁强计测量输出结果的干扰<sup>[18]</sup>,随钻测量装置应放置在无磁结构内部,并且装置前后段也应各有一段无磁钻杆来隔断钢制钻杆的磁干扰。随钻测量装置安装如图 10 所示。

接收部分组成,如图 8 所示。地下测量发射装置主要安装在井下钻具空腔内或专门的钻铤(无磁钻铤)内部,测得数据后,结果会被调制到特定载波上,经功率放大后利用钻杆与地层构成的信息通道将数据发送至孔口,地面部分利用信号接收装置接收数据信号,并完成数据的解调和显示,达到随钻测量的目的。

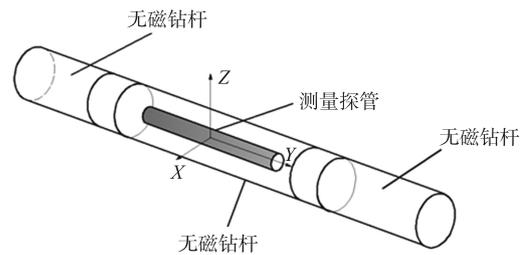


图 10 随钻测量装置抗磁干扰示意图

Fig. 10 Drilling measurement system anti-interference schematic

2.2 随钻轨迹测量数据处理软件的功能实现

2.2.1 钻孔轨迹参数录入

钻孔轨迹参数即随钻测量系统测得的原始数据多以 Word 或 Excel 的形式进行存储。本文设计的软件可以实现与数据的对接,将数据直接复制、粘贴到软件中并编号管理。钻孔轨迹参数录入界面如图 11 所示。

序号	孔径	方位	倾角	测角	测平移	-左/右	+上/-下
1	6.00	102.00	16.00	0.00			
2	6.00	102.00	16.00	0.00			
3	12.00	102.00	16.00	0.00			
4	18.00	102.00	18.00	0.00			
5	24.00	102.00	20.00	0.00			
6	30.00	100.00	22.00	-2.00			
7	36.00	98.00	24.00	-4.00			
8	42.00	96.00	26.00	-6.00			
9	48.00	94.00	28.00	-8.00			
10	54.00	92.00	30.00	-10.00			
11	60.00	90.00	32.00	-12.00			
12	66.00	88.00	34.00	-14.00			
13	72.00	86.00	34.00	-16.00			
14	78.00	84.00	32.00	-18.00			
15	84.00	82.00	30.00	-20.00			

图 11 钻孔轨迹参数录入界面

Fig. 11 Drilling trajectory parameter input interface

2.2.2 钻孔轨迹参数解算

钻孔原始测量数据录入后,系统可以根据输入算法对数据进行解算。采用平均角法分别计算出钻孔视位移、左右位移、上下位移等参数,这些参数将在后续的钻孔轨迹二维图形和三维图形绘制中被调用。若孔深用  $L$  表示,方位角用  $\alpha$  表示,  $\alpha_{Design}$  表示钻孔设计时的方位角,倾角用  $\theta$  表示;  $L_n$  表示测点  $n$  处的孔深值,同理  $\alpha_n$  和  $\theta_n$  分别表示测点  $n$  处的方位角和倾角值。上述符号含义如图 12 所示。

根据平均角法,钻孔视位移、左右位移和上下位移参数的计算公式如下:

$$X_n = \frac{L_n - L_{n-1}}{2[\cos \theta_n \cos (\alpha_n - \alpha_{Design})] + \cos \theta_{n-1} \cos (\alpha_{n-1} - \alpha_{Design})} + X_{n-1} \quad (8)$$

$$Y_n = \frac{L_n - L_{n-1}}{2[\cos \theta_n \sin (\alpha_n - \alpha_{Design})] + \cos \theta_{n-1} \sin (\alpha_{n-1} - \alpha_{Design})} + Y_{n-1} \quad (9)$$

$$Z_n = \frac{L_n - L_{n-1}}{2(\sin \theta_n + \sin \theta_{n-1})} + Z_{n-1} \quad (10)$$

2.2.3 单孔钻孔轨迹绘制

将数据录入系统并进行解算后,系统会根据解算结果绘制单个钻孔二维及三维图形。二维图形包括钻孔轨迹的水平投影图和垂直投影图,图形在相对坐标系中进行绘制,视平移作  $X$  轴,左右位移作  $Y$  轴,上下位移作  $Z$  轴。图形展示将设计钻孔和实测钻孔轨迹绘制在同一个坐标系中,可以根据孔号查看对应的钻孔轨迹图形。此外,系统还会对钻孔终孔靶点在各个方向上的偏移量进行计算并展示,系统界面如图 13 所示。

钻孔轨迹的水平投影图、垂直投影图及三维轨

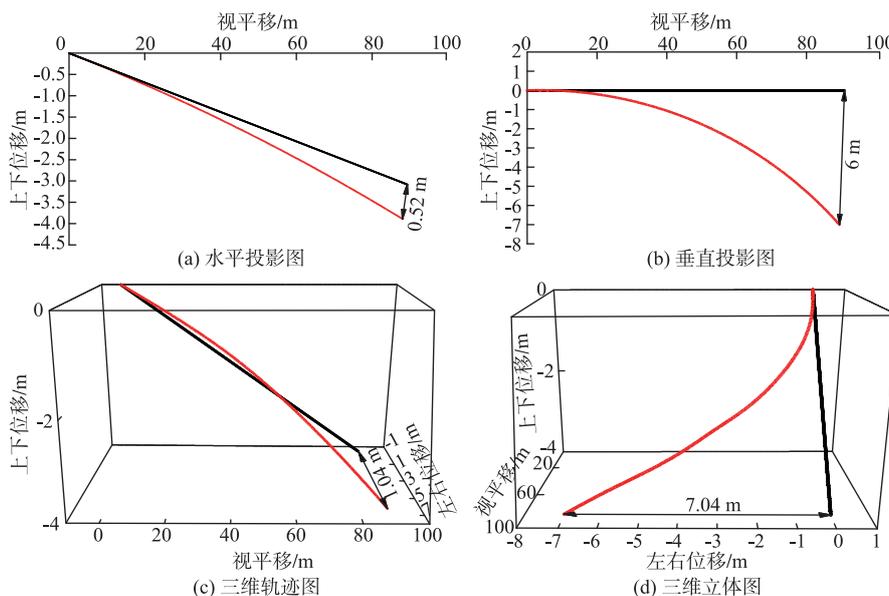


图 14 二维及三维钻孔轨迹图

Fig. 14 2D and 3D borehole traces

序号	孔深	方位	倾角	偏角	视平移	左/右	上/下
1	0.00	102.00	15.00	0.00			
2	6.00	102.00	15.00	0.00			
3	12.00	102.00	15.00	0.00			
4	18.00	102.00	15.00	0.00			
5	24.00	102.00	20.00	0.00			
6	30.00	100.00	22.00	-2.00			
7	36.00	98.00	24.00	-4.00			
8	42.00	96.00	25.00	-6.00			
9	48.00	94.00	23.00	-8.00			
10	54.00	92.00	30.00	-10.00			
11	60.00	90.00	28.00	-12.00			
12	66.00	88.00	25.00	-14.00			
13	72.00	86.00	24.00	-16.00			
14	78.00	84.00	22.00	-18.00			
15	84.00	82.00	20.00	-20.00			

图 12 公式符号示意

Fig. 12 Formula symbol diagram

迹图如图 14 所示,图中黑色虚线为设计钻孔轨迹,红色曲线为随钻测量仪实测的钻孔轨迹。此外,三维立体图还可以旋转,便于对钻孔轨迹进行多角度对比分析。

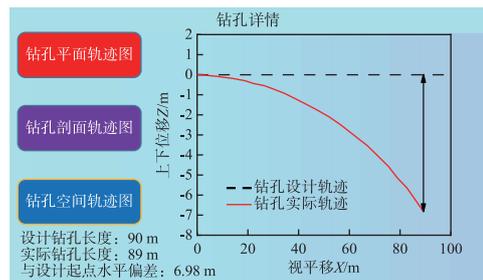


图 13 钻孔轨迹图形展示界面

Fig. 13 Drilling hole graphic display interface

### 2.2.4 工作面钻孔上图

工作面钻孔轨迹上图是指将钻孔轨迹置入矿图中,结合工作面钻孔设计来对钻孔进行轨迹分析,是对煤矿生产具有实际指导意义的一种轨迹显示方式。通过钻孔实钻轨迹上图可以分析钻孔轨迹偏离情况、钻孔瓦斯抽采空白条带、瓦斯抽采重复区域及探放水盲区等。

由钻孔抽采理论可知,瓦斯钻孔的有效抽采半径是反映钻孔抽采瓦斯范围的重要参数,是指瓦斯抽采钻孔将瓦斯含量降到突出危险指标以下的有效范围,是以钻孔轨迹轴线为轴线,以抽采半径为半径的一块区域。将钻孔轴线以抽采半径为半径向四周偏移,便可得到该钻孔的实际瓦斯抽采范围。2 个相邻钻孔的抽采范围相交之处便是抽采重复区域,而未覆盖的位置便是抽采空白区域。

在现场,钻孔是按照抽采半径均匀布置的,如图 15 所示,孔间间隔为抽采半径的 2 倍,若钻孔按照设计轨迹延伸,则钻孔的瓦斯抽采区域刚好完全覆盖工作面,无空白和重复抽采区域。图 15 中的 3 个色彩区域分别代表每个钻孔的有效抽采区域。

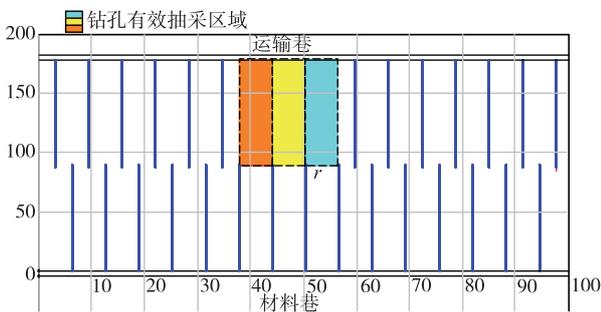


图 15 瓦斯钻孔有效抽采区域

Fig. 15 Designing effective drainage area for gas drilling

钻孔轨迹发生弯曲偏移,钻孔的有效抽采区域也随之发生弯曲偏移。当多个钻孔相互作用时,就会产生瓦斯抽采空白条带和瓦斯重复抽采区域。图 16 中,3 个色彩区域代表 3 个钻孔的实际瓦斯抽采控制区域,红色线代表钻孔的实际钻进轨迹,黑色直线代表工作面预抽瓦斯钻孔的设计轨迹。由于钻孔的实际钻进轨迹不是直线而是偏离设计轨迹的曲线,故钻孔瓦斯抽采控制区域也由规则矩形变为不规则的弧形,相邻 2 个钻孔的弯曲偏左或偏右,造成钻孔控制区域发生图中的变化,相邻 2 个钻孔的控制区域可能出现交叉,于是出现了瓦斯重复抽采区域,而钻孔未覆盖的区域即为瓦斯抽采空白条带。

本文开发设计的软件除具备钻孔轨迹参数解算、轨迹图显示及上图等功能外,还可对钻孔轨迹图形进行存储、打印及输出,同时还可实现钻孔数据的再编辑和修、更正。

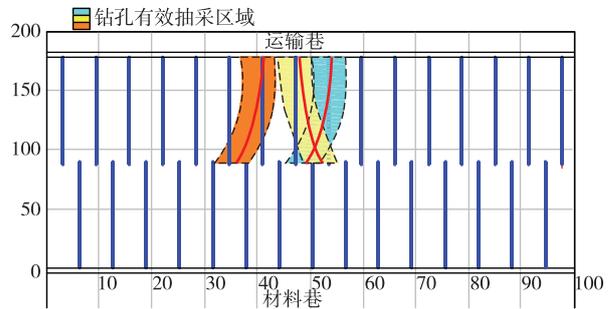


图 16 实际瓦斯钻孔有效抽采区域示意

Fig. 16 Actual drainage area for actual gas drilling

## 3 数据处理软件的应用

基于山西汾西矿业(集团)有限责任公司贺西煤矿随钻轨迹测量需求,成功研制了一种矿用井下近水平普通钻孔随钻轨迹测量装置,即 JWC-2 型矿用钻孔随钻测量仪,与开发的钻孔轨迹数据处理软件配合使用,进行了现场试验研究。

### 3.1 JWC-2 型矿用钻孔随钻轨迹测量系统概述

JWC-2 型矿用钻孔随钻轨迹测量仪(以下简称随钻轨迹测量仪)集成了高精度传感器、计算机、仪器加工、钻孔工程等技术,由孔内探管、手持控制仪及控制软件、高强度无磁保护钻杆组成。可用于井下所有使用直径 50 mm 以上钻杆的含瓦斯或具有煤尘爆炸危险的煤矿地质勘探孔、瓦斯抽放孔、探水孔等近水平钻孔实钻轨迹的随钻测量,可完成对水平孔、俯仰孔及分支孔的随钻测量工作。

### 3.2 现场测试

#### 3.2.1 工作面概况

现场测试选在贺西煤矿 3316 工作面运输巷道,工作面走向长度 2 122 m,倾向长度 176 m,3316 材料巷、运输巷均采用综掘工艺。工作面开采山西组 3<sup>#</sup>煤层,煤质硬度大、脆度大,属焦煤。煤层倾角 0°~6°,煤层平均厚度 1.75 m,容重 13.9 kN/m<sup>3</sup>。

#### 3.2.2 钻孔布置形式

在 3316 运输巷巷道右帮铺设一条  $\Phi 300$  mm 的瓦斯抽采管路,在距巷道口 85 m 处开始施工钻孔,沿煤层倾向布置,巷道口第一个钻孔为 1<sup>#</sup>孔,最后一个钻孔距离工作面第三切眼不超过 10 m,每隔 6.3 m 布置一个钻孔,设计钻孔长度为 90 m,方位角 211°(与煤帮垂直),钻孔开孔位置距底板 1.5 m,

共施工 322 个钻孔,总进尺 28 980 m,部分钻孔施工信息如表 2 所示。

表 2 部分施工钻孔信息表  
Table 2 Construction drilling information

钻孔编号	距底板开孔高度/m	距巷道口距离/m	方位角/(°)	倾角/(°)	设计长度/m
50#	1.50	393.40	211.00	-3.00	90.00
51#	1.50	399.70	211.00	-3.00	90.00
52#	1.50	406.00	211.00	-2.00	90.00
53#	1.50	412.30	211.00	-2.00	90.00
54#	1.50	418.60	211.00	-2.00	90.00
55#	1.50	424.90	211.00	-2.00	90.00
56#	1.50	431.20	211.00	-3.00	90.00
57#	1.50	437.50	211.00	-3.00	90.00
58#	1.50	443.80	211.00	-2.00	90.00
59#	1.50	450.10	211.00	-2.00	90.00
60#	1.50	456.40	211.00	-2.00	90.00

### 3.3 数据结果分析

#### 3.3.1 单钻孔数据分析

采用 JWC-2 型矿用随钻测量仪获取 50#~60# 钻孔实际钻进轨迹参数,通过软件绘制出每个钻孔的轨迹水平投影图、垂直投影图和三维立体图,并分别对每个钻孔轨迹信息进行分析。本文以 51# 孔为例,详细介绍该孔的实测轨迹结果,其余钻孔的分析结果以表格形式列出。

51# 孔钻进过程中,随钻测量仪记录的原始数据和后续轨迹解算结果如表 3 所示。

除开孔 2 m 采集间隔时长 9.77 min 外,继续钻进过程中,为保证钻孔原始数据采集的精准,采集时间间隔控制在 3 min 以内。表 3 中的数据实时、完整、准确地呈现了钻孔孔深、倾角、方位角、视位移、上下位移及左右位移的变化规律,表征了钻进过程中轨迹的立体信息。

表 3 51# 钻孔数据结果  
Table 3 Drilling data results for 51#

时间	孔深/m	倾角/(°)	方位角/(°)	视位移/m	上下位移/m	左右位移/m	时间	孔深/m	倾角/(°)	方位角/(°)	视位移/m	上下位移/m	左右位移/m
2021-11-21 17:13:30	0.00	-3.00	211.00	0.00	0.00	0.00	2021-11-21 18:00:12	27.00	-3.81	210.38	26.95	-1.56	-0.13
2021-11-21 17:23:16	2.00	-3.09	210.98	2.00	-0.11	0.00	2021-11-21 18:01:28	28.00	-3.85	210.38	27.95	-1.63	-0.14
2021-11-21 17:24:44	3.00	-3.11	210.96	3.00	-0.16	0.00	2021-11-21 18:02:34	29.00	-3.85	210.37	28.95	-1.70	-0.15
2021-11-21 17:25:46	4.00	-3.14	210.93	3.99	-0.21	0.00	2021-11-21 18:03:48	30.00	-3.92	210.35	29.95	-1.76	-0.16
2021-11-21 17:27:37	5.00	-3.14	210.92	4.99	-0.27	0.00	2021-11-21 18:04:49	31.00	-3.92	210.33	30.94	-1.83	-0.18
2021-11-21 17:29:57	6.00	-3.14	210.92	5.99	-0.32	0.00	2021-11-21 18:06:04	32.00	-3.93	210.32	31.94	-1.90	-0.19
2021-11-21 17:32:11	7.00	-3.15	210.91	6.99	-0.38	-0.01	2021-11-21 18:07:05	33.00	-3.93	210.32	32.94	-1.97	-0.20
2021-11-21 17:33:40	8.00	-3.16	210.89	7.99	-0.43	-0.01	2021-11-21 18:08:30	34.00	-4.01	210.29	33.94	-2.04	-0.21
2021-11-21 17:35:17	9.00	-3.18	210.87	8.99	-0.49	-0.01	2021-11-21 18:09:31	35.00	-4.03	210.29	34.93	-2.11	-0.22
2021-11-21 17:36:37	10.00	-3.20	210.83	9.99	-0.55	-0.01	2021-11-21 18:10:36	36.00	-4.07	210.26	35.93	-2.18	-0.24
2021-11-21 17:37:49	11.00	-3.21	210.81	10.98	-0.60	-0.02	2021-11-21 18:11:37	37.00	-4.10	210.24	36.93	-2.25	-0.25
2021-11-21 17:39:02	12.00	-3.23	210.81	11.98	-0.66	-0.02	2021-11-21 18:12:43	38.00	-4.10	210.22	37.93	-2.32	-0.26
2021-11-21 17:40:11	13.00	-3.28	210.76	12.98	-0.71	-0.02	2021-11-21 18:13:44	39.00	-4.20	210.19	38.92	-2.39	-0.28
2021-11-21 17:41:21	14.00	-3.29	210.75	13.98	-0.77	-0.03	2021-11-21 18:15:02	40.00	-4.21	210.17	39.92	-2.47	-0.29
2021-11-21 17:43:15	15.00	-3.29	210.72	14.98	-0.83	-0.03	2021-11-21 18:16:04	41.00	-4.22	210.16	40.92	-2.54	-0.30
2021-11-21 17:44:21	16.00	-3.29	210.65	15.98	-0.89	-0.04	2021-11-21 18:17:26	42.00	-4.27	210.16	41.92	-2.62	-0.32
2021-11-21 17:45:21	17.00	-3.33	210.65	16.97	-0.94	-0.04	2021-11-21 18:18:27	43.00	-4.27	210.11	42.91	-2.69	-0.33
2021-11-21 17:46:36	18.00	-3.33	210.63	17.97	-1.00	-0.05	2021-11-21 18:20:40	44.00	-4.35	210.09	43.91	-2.76	-0.35
2021-11-21 17:47:40	19.00	-3.35	210.57	18.97	-1.06	-0.06	2021-11-21 18:21:34	45.00	-4.37	210.09	44.91	-2.84	-0.37
2021-11-21 17:49:21	20.00	-3.35	210.54	19.97	-1.12	-0.06	2021-11-21 18:21:53	46.00	-4.38	210.09	45.90	-2.92	-0.38
2021-11-21 17:52:25	21.00	-3.42	210.50	20.97	-1.18	-0.07	2021-11-21 18:23:05	47.00	-4.43	210.08	46.90	-2.99	-0.40
2021-11-21 17:53:38	22.00	-3.61	210.50	21.96	-1.24	-0.08	2021-11-21 18:24:22	48.00	-4.46	210.08	47.90	-3.07	-0.41
2021-11-21 17:54:48	23.00	-3.64	210.46	22.96	-1.30	-0.09	2021-11-21 18:25:24	49.00	-4.55	210.06	48.89	-3.15	-0.43
2021-11-21 17:56:42	24.00	-3.68	210.43	23.96	-1.37	-0.10	2021-11-21 18:26:39	50.00	-4.56	210.02	49.89	-3.23	-0.45
2021-11-21 17:57:48	25.00	-3.71	210.41	24.96	-1.43	-0.11	2017-11-21 18:27:42	51.00	-4.62	210.01	50.89	-3.31	-0.46
2021-11-21 17:59:11	26.00	-3.80	210.41	25.96	-1.50	-0.12	2021-11-21 18:29:04	52.00	-4.68	210.00	51.88	-3.39	-0.48

续表3

时间	孔深/ m	倾角/ (°)	方位角/ (°)	视位移/ m	上下位 移/m	左右位 移/m	时间	孔深/ m	倾角/ (°)	方位角/ (°)	视位移/ m	上下位 移/m	左右位 移/m
2021-11-21 18:30:05	53.00	-4.71	209.98	52.88	-3.47	-0.50	2021-11-21 18:51:54	71.00	-5.40	209.58	70.81	-5.07	-0.87
2021-11-21 18:31:22	54.00	-4.73	209.98	53.88	-3.55	-0.52	2021-11-21 18:53:18	72.00	-5.49	209.56	71.80	-5.17	-0.90
2021-11-21 18:32:25	55.00	-4.74	209.98	54.87	-3.64	-0.53	2021-11-21 18:54:28	73.00	-5.50	209.48	72.80	-5.26	-0.92
2021-11-21 18:34:05	56.00	-4.82	209.97	55.87	-3.72	-0.55	2021-11-21 18:55:43	74.00	-5.52	209.46	73.79	-5.36	-0.95
2021-11-21 18:35:11	57.00	-4.82	209.94	56.87	-3.80	-0.57	2021-11-21 18:56:48	75.00	-5.53	209.45	74.79	-5.45	-0.98
2021-11-21 18:36:39	58.00	-4.87	209.94	57.86	-3.89	-0.59	2021-11-21 18:58:07	76.00	-5.54	209.42	75.78	-5.55	-1.00
2021-11-21 18:37:44	59.00	-5.00	209.89	58.86	-3.98	-0.61	2021-11-21 18:59:16	77.00	-5.56	209.37	76.78	-5.65	-1.03
2021-11-21 18:39:28	60.00	-5.09	209.84	59.85	-4.06	-0.63	2021-11-21 19:00:57	78.00	-5.56	209.36	77.77	-5.74	-1.06
2021-11-21 18:40:34	61.00	-5.13	209.84	60.85	-4.15	-0.65	2021-11-21 19:02:15	79.00	-5.57	209.36	78.77	-5.84	-1.09
2021-11-21 18:41:51	62.00	-5.13	209.82	61.85	-4.24	-0.67	2021-11-21 19:04:06	80.00	-5.61	209.33	79.76	-5.94	-1.12
2021-11-21 18:42:56	63.00	-5.21	209.78	62.84	-4.33	-0.69	2021-11-21 19:05:33	81.00	-5.61	209.29	80.76	-6.04	-1.15
2021-11-21 18:44:02	64.00	-5.22	209.77	63.84	-4.42	-0.71	2021-11-21 19:06:59	82.00	-5.67	209.23	81.75	-6.14	-1.18
2021-11-21 18:45:03	65.00	-5.24	209.74	64.83	-4.51	-0.73	2021-11-21 19:09:59	83.00	-5.70	209.20	82.74	-6.23	-1.21
2021-11-21 18:46:16	66.00	-5.29	209.73	65.83	-4.61	-0.75	2021-11-21 19:11:05	84.00	-5.75	209.16	83.74	-6.33	-1.24
2021-11-21 18:47:17	67.00	-5.32	209.69	66.82	-4.70	-0.78	2021-11-21 19:13:08	85.00	-5.78	209.16	84.73	-6.43	-1.27
2021-11-21 18:48:20	68.00	-5.34	209.65	67.82	-4.79	-0.80	2021-11-21 19:14:59	86.00	-5.78	209.14	85.73	-6.54	-1.30
2021-11-21 18:49:33	69.00	-5.37	209.62	68.82	-4.88	-0.82	2021-11-21 19:16:08	87.00	-5.84	209.14	86.72	-6.64	-1.33
2021-11-21 18:50:48	70.00	-5.39	209.59	69.81	-4.98	-0.85	2021-11-21 19:17:53	88.00	-5.92	209.06	87.72	-6.74	-1.37

51#钻孔的垂直投影图、水平投影图及三维立体图如图 17 所示。

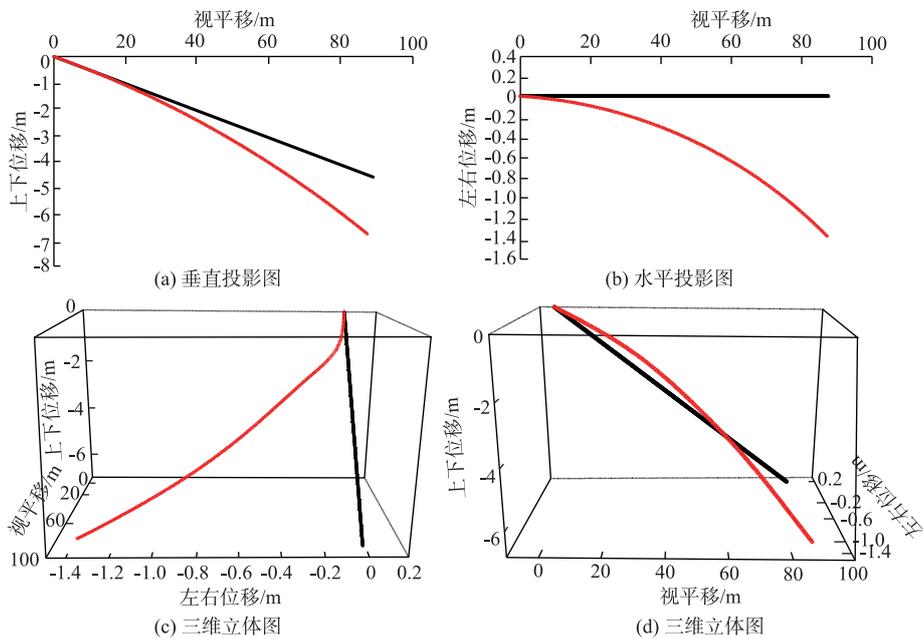


图 17 51#钻孔轨迹图

Fig. 17 Borehole trace of 51#

如图 17(a) 展示的钻孔轨迹垂直投影所示, 51# 钻孔终孔位置与设计靶点垂直偏差 3.60 m, 终孔位置与开孔位置垂距为 6.74 m; 如图 17(b) 钻孔轨迹水平投影所示, 51# 钻孔终孔位置与设计靶点水平偏差 1.37 m; 由图 17(c) (d) 可知, 51# 钻孔终孔位置与设计钻孔靶点空间矢量总偏差为 3.27 m。钻孔

设计长度 90 m, 实际长度 88 m; 钻孔开孔倾角为  $-3^\circ$ , 终孔位置倾角为  $-5.92^\circ$ , 倾角误差  $2.92^\circ$ ; 开孔方位角为  $211.00^\circ$ , 终孔方位角为  $209.06^\circ$ , 方位角误差  $1.4^\circ$ 。

同理可得其余钻孔轨迹数据, 11 个钻孔数据结果如表 4 所示。

表 4 随钻测量钻孔数据

Table 4 Drilling data measurements while drilling

钻孔编号	设计长度/ m	实钻长度/ m	开孔倾角/ (°)	终孔倾角/ (°)	开孔方位角/ (°)	实际方位角/ (°)	水平偏移/ m	垂直偏移/ m	偏移矢量和/ m
50#	90.00	90.00	-3.00	-4.90	211.00	225.49	11.95	1.60	12.11
51#	90.00	90.00	-3.00	-5.92	211.00	209.06	1.37	1.76	3.27
52#	90.00	90.00	-2.00	-4.83	211.00	205.60	6.42	2.23	6.81
53#	90.00	83.00	-2.00	-5.73	211.00	219.63	6.60	2.58	10.33
54#	90.00	88.30	-2.00	-6.23	211.00	224.33	12.95	3.80	13.56
55#	90.00	89.30	-2.00	-3.00	211.00	201.18	6.98	0.81	7.04
56#	90.00	90.00	-3.00	-6.00	211.00	215.82	3.58	2.37	4.30
57#	90.00	90.00	-3.00	-6.43	211.00	207.63	10.42	2.59	10.77
58#	90.00	90.00	-2.00	-3.96	211.00	204.50	0.56	1.54	1.65
59#	90.00	88.00	-2.00	-6.55	211.00	199.52	8.16	3.12	9.15
60#	90.00	86.00	-2.00	-7.49	211.00	199.82	14.44	3.74	15.95

由表 4 可以看出,试验的 11 个钻孔中水平偏差最大达 14.44 m,约等于 2.3 个钻孔间距距离,这导致该瓦斯抽采钻孔的终孔位置严重偏离预定轨迹,造成大面积的抽采空白区域。同时,最大垂直偏差达 3.80 m,而 3316 工作面的煤层厚度不足 2 m。由此可知,部分钻孔已经偏离本煤层进入顶、底板岩层中,造成进入顶、底板岩层中的钻孔段无瓦斯抽采作用。

因工作面地层结构比较复杂,故部分钻孔的实际轨迹与设计轨迹偏差较大。由表 4 可以看出钻孔倾角逐渐向下偏移,这是因为钻杆的自重作用随着钻杆长度的增加而加大,从而使钻杆轨迹逐渐下移。方位角的变化与煤层软硬有关,其东西方向不定,导致方位角的变化无固定规律。同时可以看出钻杆轨迹偏移会产生累计效应,当一个方向发生偏移量增大时,在这个方向上的偏移会越来越大。

### 3.3.2 钻孔轨迹上图分析

将以上 11 个瓦斯抽采钻孔的空间轨迹利用钻孔轨迹图展示软件上图到 3316 工作面矿图中,结果如图 18 所示。

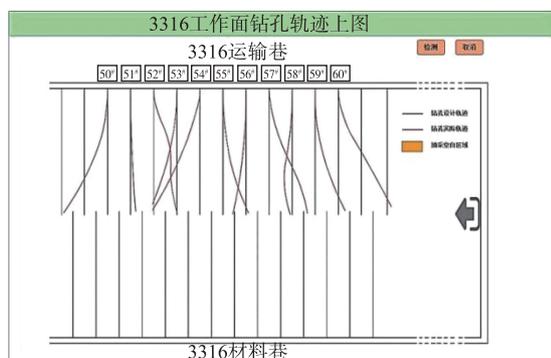


图 18 3316 工作面钻孔轨迹上图

Fig. 18 Drilling trajectory of 3316 working face

钻孔轨迹上图完成后,点击软件检测按钮可以自动分析瓦斯抽采钻孔的空白条带,并在矿图中标记出来,以便钻孔设计方案的修改,做出相应的瓦斯抽采决策。瓦斯抽采空白条带检测结果如图 19 所示。

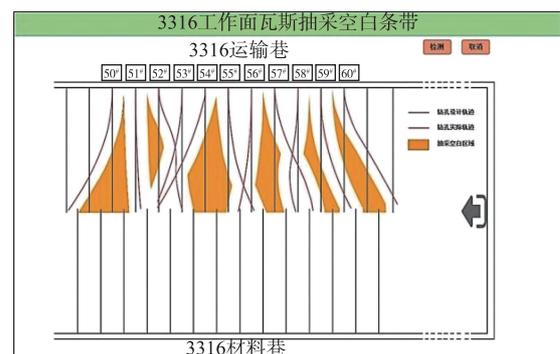


图 19 瓦斯抽采空白条带

Fig. 19 Gas extraction blank strip detection

通过多组钻孔轨迹测量,图 19 清晰地显示了钻孔瓦斯抽采空白条带及重复抽采区域,为后续瓦斯抽采管理提供了依据。

## 4 结 论

1) 对 5 种钻孔轨迹参数解算算法进行归纳和对比分析,发现均角全距法和全角半距法与现场较为吻合。

2) 基于地磁场重力加速度计和磁强计组合的随钻测量系统更适合井下近水平钻孔的轨迹测量。

3) 选用 Visual C++ 6.0 开发了随钻轨迹测量数据处理及钻孔轨迹图展示软件,可以实现钻孔轨迹参数的录入、解算、绘图和展示,具有界面友好、操作简单特点。

4) 在贺西煤矿开展工业性试验,运用该系统获得了钻孔轨迹二维和三维图形,并与瓦斯抽采系统图协同,可识别出试验区域瓦斯抽采空白条带,对煤矿生产的安全及决策具有一定指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 沈承德. 面向防冲的围岩应力随钻测量试验研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2022.
- [2] 高珺, 李泉新, 陈龙, 等. 煤矿井下随钻测量数据声波传输系统[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2507-2512. GAO Jun, LI Quanxin, CHEN Long, et al. Acoustic transmission system of measurement data while drilling in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2507-2512.
- [3] 石智军, 姚宁平, 胡少韵, 等. 煤矿井下瓦斯抽采(放)钻孔施工新技术[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2008: 11-12.
- [4] 刘宗伟. 矿用水平钻机钻孔轨迹测量与跟踪方法研究[D]. 太原:太原理工大学, 2018.
- [5] 李春元, 张勇, 李佳, 等. 采空区瓦斯宏观流动通道的高位钻孔抽采技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 391-397. LI Chunyuan, ZHANG Yong, LI Jia, et al. Highly-located boreholes drainage technology of gas macroscopic flow channel in goaf[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(2): 391-397.
- [6] 周红星, 王亮, 程远平, 等. 低透气性强突出煤层瓦斯抽采导流通道的构建及应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1456-1460. ZHOU Hongxing, WANG Liang, CHENG Yuanping, et al. Guide channel construction for gas drainage and its applications in coal seams with low permeability and strong burst-proneness [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1456-1460.
- [7] SALVE R, OLDENBURG C M. Water flow within a fault in altered non-welded tuff [J]. Water Resources Research, 2001, 37(12): 3043-3056.
- [8] 陈天华. 面向对象程序设计与 Visual C++ 6.0 教程[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2013: 163-167.
- [9] 王鹏飞, 王鹏. 基于 Visual C++ 6.0 的 Windows 应用程序定时器研究[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(2): 44-48. WANG Pengfei, WANG Peng. Windows platform application timer research based on Visual C++ 6.0 [J]. Computer Technology and Development, 2013, 23(2): 44-48.
- [10] 苏义脑. 水平井井眼轨道控制[M]. 北京:石油工业出版社, 2000: 261-266.
- [11] LIEW J, CHEN W F. The civil engineering handbook [M]. CRC Press, Boca Raton, 2003.
- [12] KRAMER S R, RODENBAUGH T J, CONROY M W. The use of trenchless technologies for transmission and distribution projects [C]//Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, IEEE, 1994: 302-308.
- [13] ARIARATNAM S T, CHAN W, CHOI D. Utilization of trenchless construction methods in mainland China to sustain urban infrastructure [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2006, 11(3): 134-141.
- [14] ARIARATNAM S T, ALLOUCHE E N. Suggested practices for installations using horizontal directional drilling [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2000, 5(4): 142-149.
- [15] POLAK M A, LASHEEN A. Mechanical modelling for pipes in horizontal directional drilling [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(1): 47-55.
- [16] LUEKE J S, ARIARATNAM S T. Surface heave mechanisms in horizontal directional drilling [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2005, 131(5): 540-547.
- [17] 罗武胜, 徐涛, 杜列波. 基于加速度计和磁强计的定向钻进姿态测量及方位校正[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(1): 106-110. LUO Wusheng, XU Tao, DU Liebo. Directional drilling attitude measurement and azimuth correction with accelerometers and magnetometers [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(1): 106-110.
- [18] 李志扬. 基于深度学习的地磁场干扰事件识别方法研究[D]. 北京:防灾科技学院, 2022.