

# 煤矿井下随钻测量及钻孔数据处理软件开发与应用

董 洪 波

(中国煤炭科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘 要:**为解决煤矿井下随钻测量软件功能单一、操作不便、信息融合不足等问题,采用 C 号语言与 SQL Server 数据库开发了随钻测量及钻孔数据处理软件。该软件具有随钻测量、钻孔数据处理、钻机监测诊断等三大功能模块,可实现对探管数据解析、钻孔轨迹实时测量、钻孔轨迹数据的深度挖掘、钻机状态的实时监测与故障诊断。三大模块数据有机融合,可简化施工人员操作,帮助施工人员更加全面掌握施工信息、及时作出相应决策。现场试验证明,随钻测量及钻孔数据处理软件通信稳定、测量准确、功能全面、操作简单,为优化定向钻孔施工提供了技术支撑。

**关键词:**随钻测量;钻孔数据处理;钻机监测诊断;定向钻进

中图分类号:TN06;TD41

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)06-0195-06

## Development and application of software for measurement while drilling and borehole data processing in coal mine

DONG Hongbo

(Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corporation, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of limited function, operating inconvenience and insufficient information fusion of the available software for measurement while drilling (MWD) in coal mine, a new software for MWD and borehole data processing using C language and SQL Server database has been developed. The software has three function modules including MWD, borehole data processing and monitoring-diagnosis of drilling machine, and can be used to conduct the analysis of probe data, the real-time measurement of borehole trajectory, the deep mining of borehole trajectory data, the real-time monitoring-diagnosis of drilling machine status. The integration of the above three modules can simplify the operation of constructors, help them to grasp comprehensive construction information and make corresponding decisions in time. The field tests shows that the present software for MWD and data processing is stable, accurate, multifunctional and easy to operate, which provides technical support for the optimization of directional drilling construction.

**Key words:** measurement while drilling; borehole data processing; monitoring-diagnosis of drilling machine; direction drilling

## 0 引 言

随钻测量技术与定向钻进技术相结合,具有钻进速度快、定向精度高、“一孔多分支”等优点<sup>[1-3]</sup>,逐渐成为高产高效煤矿井下钻孔施工的有效技术手段,并应用于煤矿瓦斯治理、探放水、地质勘探等领域<sup>[4-7]</sup>。随钻测量软件可实现测量探管数据的解析与显示,其基本的要求为数据获取、钻场管理、钻孔

轨迹设计、实钻轨迹的显示等<sup>[8-9]</sup>。但随着定向钻进技术的发展和施工工艺的提升,施工现场对随钻测量系统提出越来越高的要求<sup>[10-12]</sup>,比如:要适应不同的施工工艺;能够预测与控制轨迹;能三维显示钻孔的孔群分布,并避免串孔行为;监测和诊断钻机状态;多数据的信息融合与决策。

文献[13]根据回转钻进随钻测量装置数据处理软件的需求,设计了软件功能模块,实际应用结果验证了该软件具有良好的性能。文献[14-16]基于

收稿日期:2018-02-24;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.06.033

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045003-002)

作者简介:董洪波(1979—),男,辽宁朝阳人,副研究员,博士。Tel:029-88767113, E-mail: donghongbo@cctegxian.com

引用格式:董洪波. 煤矿井下随钻测量及钻孔数据处理软件开发与应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 195-200, 216.

DONG Hongbo. Development and application of software for measurement while drilling and borehole data processing in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 195-200, 216.

不同软件开发平台,设计了随钻测量/监控软件,结果表明,设计的软件可以实现钻孔轨迹数据的测量、显示与存储,以及部分数据处理功能。

目前,煤矿井下常用的随钻测量软件虽能进行钻孔轨迹测量、显示与存储,但钻孔数据处理功能薄弱,不具备钻机状态监测诊断功能,无法实现钻孔施工信息与钻机状态参数信息的有机融合。致使随钻测量系统的应用受到较大限制,造成现场施工的诸多不便。因此,依据中煤科工集团西安研究院有限公司(以下简称西安院)多年来积累的施工经验,开发出随钻测量及钻孔数据处理软件。它是施工现场智慧的一种实体呈现,具有界面友好、功能强大、使用便利、操作简单等特点,可帮助施工人员完成钻孔轨迹数据的测量、显示与存储的同时,还可以实时处理钻孔数据,实时监测诊断钻机参数,使钻孔施工人员更加全面掌握施工信息,为优化定向钻孔施工提供技术支撑。

## 1 随钻测量与钻孔数据处理软件系统设计

### 1.1 整体设计

煤矿井下随钻测量定向钻进系统主要由定向钻机、泥浆泵组、通信钻杆、测量探管、单弯螺旋钻具、定向钻头、孔口监视器、通缆送水器等组成<sup>[17-20]</sup>,如图1所示。

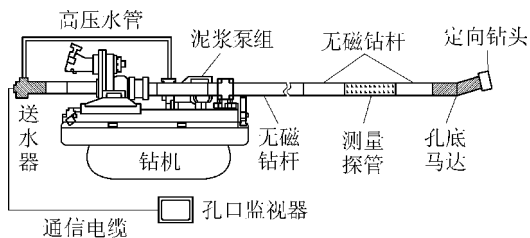


图1 煤矿井下随钻测量定向钻进系统连接示意

Fig.1 Connection scheme of MWD direction drilling system under coal mine

鉴于定向钻进的现场需求,随钻测量及钻孔数据处理软件研发了3大功能:随钻测量、钻孔数据处理和钻机监测诊断,如图2所示。其中随钻测量模块包含数据获取及解析、系统参数设置、钻场及钻孔设计、实钻测量及操作、图形显示及处理、钻孔拆分工艺的操作、数据管理及操作等,重点关注数据的解析与显示,以及适应不同施工工艺的逻辑操作。钻孔数据处理模块是对实钻轨迹深层次的数据挖掘,将抽象的施工技巧进行有效的实体呈现,更方便于

现场施工,具体包括钻孔轨迹预测及控制、孔群的三维管理、防碰雷达预判及摩阻计算等功能。监测诊断模块主要是对设备运行状态的监测与诊断,以及对孔内事故数据的有效管理。

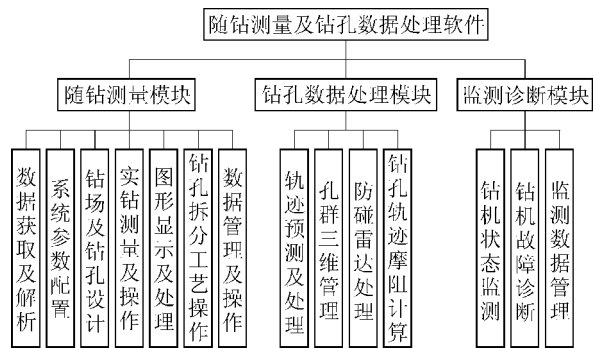


图2 随钻测量及钻孔数据处理软件模块

Fig.2 Module of MWD and borehole data processing software

### 1.2 关键技术

1) 通信技术的适应性。经过多年的潜心研究,已形成 YHD1-1000、YHD1-1000(A)、YHD2-1000、YHD2-1000(A)、YZG-15T;YSXW 等多款有线、无线随钻测量设备。随钻测量及数据处理软件在实施过程中要解决不同型号硬件的适应性问题,要实现与已有随钻测量产品进行有效配合和无缝连接。

2) 施工工艺的适应性。在定向钻的施工过程中,为获得良好的抽采效果,除进行主孔施工外,还要进行分支孔施工。开分支施工分为前进式开分支与后退式开分支。前进式开分支即每次拆分后,继续施工的是主孔,拆分后剩余部分是分支孔。后退式开分支即先完成主孔,再退回钻机依次开分支,新施工钻孔为分支孔。2种的施工工艺中对钻孔拆分方式有较大区别,简单的根目录式开分支操作难以满足不同工况。如何按照施工工艺进行分支孔构建与管理是随钻测量及数据处理软件需要解决的第2个难点。

3) 钻孔轨迹精确控制。在定向钻进的施工过程中,为获取最佳的抽采效果,需要对钻孔轨迹进行准确的预测和有效的控制。由于钻孔轨迹易受岩层地质条件、煤层分布、钻杆重力等因素的影响,工具面向角对倾角、方位角的影响趋势比较明确,但是它们之间量化的关系很难确定。现有的轨迹控制是通过人工经验来完成,经验丰富的工人能较好控制轨迹走向,否则,效果不佳。如何将这种抽象的人工经验实例化,弄清钻机的输入参数与钻孔轨迹之间的关系,解决人工经验中的不确定性,是随钻测量及数据处理软件需要解决的第3个问题。

4) 钻孔防碰处理技术。已有的随钻测量软件对钻孔轨迹进行单孔二维呈现, 只显示“水平—左右”和“水平—上下”2个平面投影, 无法直观显示钻孔的立体走向, 更无法对多个钻孔形成的孔群进行有效管理。如何对钻孔进行有效的三维管理, 并对邻近钻孔出现串孔的可能性进行预判, 防止钻孔碰撞串孔, 成为随钻测量及数据处理软件需要解决的第4个问题。

5) 钻机监测与诊断。已有的随钻测量软件仅对钻孔数据进行关注, 而忽视钻机本身的运行状态。定向钻机是一种结构复杂、工作环境恶劣、且多源振动的一种动力机械, 其运行状态的好坏直接影响钻孔施工。在定向钻进施工过程中, 只有将钻机状态进行有效监测, 对钻机故障进行预判, 才能更好地指导施工。

## 2 随钻测量与钻孔数据处理软件功能

### 2.1 基于串口通信技术

串口是计算机与单片机交互数据的主要接口, 被广泛应用于仪器仪表、工业监测中。通信协议是指通信的双方所达成的一种共识的约定, 包括对数据格式、同步方式、传送速度、传送步骤、检查纠错方式以及控制字符的定义等, 在双方的通信中共同遵守。随钻测量及钻孔数据处理软件结合西安院已有随钻测量产品的特点, 设置一种专用的通信方式, 其数据的通信流程如图3所示。

计算机与测量探管数据通信过程如下: 首先, 接收端的多线程启动, 并进入空闲状态, 判断串口是否收到数据, 未接受数据时一直处于空闲状态; 如果收到数据, 将数据放入接收缓冲区, 实现数据入栈。随后判断缓冲区数据是否大于一帧。如不满足, 返回空闲状态。当缓冲区数据大于一帧时, 第一个字节数据出栈, 并判断该数据是否为一帧数据的起始标志。如不是, 舍弃该数据, 并将后续数据向前移位, 最后一位由新接收补位。当一帧数据的起始标志出现时, 直接出栈一帧数据, 并对数据进行格式校验。满足校验条件时, 视为该帧数据有效, 存入全局变量, 否则, 舍弃该数据, 返回循环。

此外, 串口通信的启动与关闭以软件系统的命令为准, 不再详细讨论。

### 2.2 随钻测量模块

随钻测量模块是在测量探管及计算机实现串口通信后, 对获取的数据进行解析, 按照施工要求构建

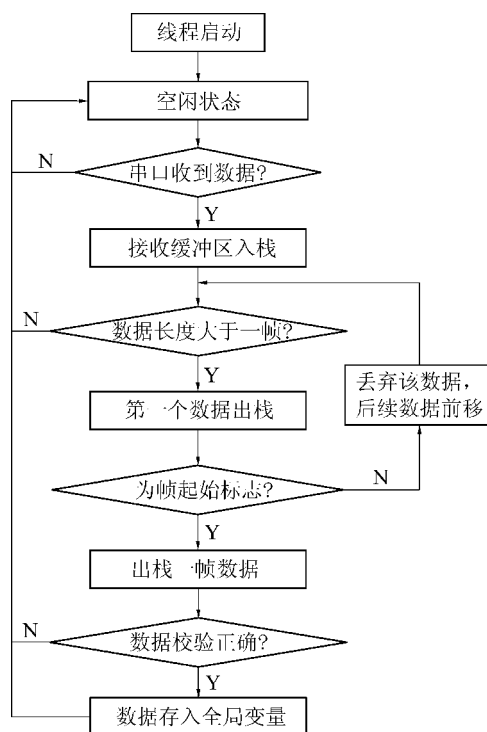


图3 串口数据通信流程

Fig.3 Flowchart of serial-port data communication

钻场与钻孔、创建实钻测量的操作逻辑、对钻孔轨迹进行图形显示与数据管理, 并匹配施工工艺进行分支孔操作。其操作流程及数据流向如图4所示, 具体功能如下所述:

1) 数据的获取与解析。当探管数据以一帧为单位进入系统后, 以 AA 55 为起始标志、以 14 为结束标志, 依次解析出倾角、方位角、工具面向角等数据, 并将解析后的数据依次存入数据库中。

2) 系统的参数配置。当软件初次使用时, 需要对系统的参数进行有效配置, 具体包括设备串口号、曲线颜色宽度和类型的设置、轨迹计算方法的选择、探管类型的选择、信号处理板的选择、模块启动的选择等。其中轨迹计算方法分为平均角法与校正平均角法, 将探管的直接测量角度数据转化为钻孔轨迹的三维坐标。软件第一次启动后的系统配置, 除非更换了其他类型的探管, 通常情况下无需二次配置。

3) 钻场及钻孔的设计。构建钻场时, 除对钻场序列管理外, 还可对钻场的一些特殊情况, 比如施工用途、岩层分布、含水特性等进行备注。选中钻场后, 对钻孔进行新建时, 需依据地质条件和人工经验分析后, 输入主设计方位角、开孔倾角、开孔方位、磁偏角及磁场强度等信息方便指导开孔施工。新建钻孔完成后, 输入设计轨迹, 可对设计轨迹进行摩阻校

核,判断设计轨迹是否合理。

4) 实钻测量及操作。施工开始后,进行实钻测量的相关操作。首先依据钻杆长度和施工要求设置孔深增长量。随后,校核当螺杆马达弯头竖直向上时,工具面向角是否为零。钻进之前按照施工要求调整工具面。在达到预期测点后,点击测量操作,记录探管数据,自动计算并保存钻孔轨迹坐标。

5) 图形显示及处理。针对实钻数据,不仅可显示其“水平—左右”和“水平—上下”的投影,还可在图形中选择顶板、底板、设计轨迹和主孔、分支孔的显示,并对图形进行放大、缩小、前后左右移动的操作,可保存当前视图或者自定义比例的视图显示。

6) 钻孔拆分工艺操作。针对前进式开分支,依据其施工特点在分支点对已完成钻孔进行拆分,在数据库中对主孔数据列表拆分,孔口至分支点的数据不变,分支点至孔底的数据转移至分支孔列表中,新施工数据增加至主孔数据的分支点之后。而后退式开分支,针对其特点在选定的分支点时新建分支孔列表,数据库中保留主孔数据不变,新施工数据放置于分支孔列表末端。

7) 数据管理及操作。针对钻场、钻孔及轨迹等不同类别的数据,均可进行删除操作。可对单个钻孔、单个钻场和所有钻场的数据进行导入导出,保证数据的搬移与合并。

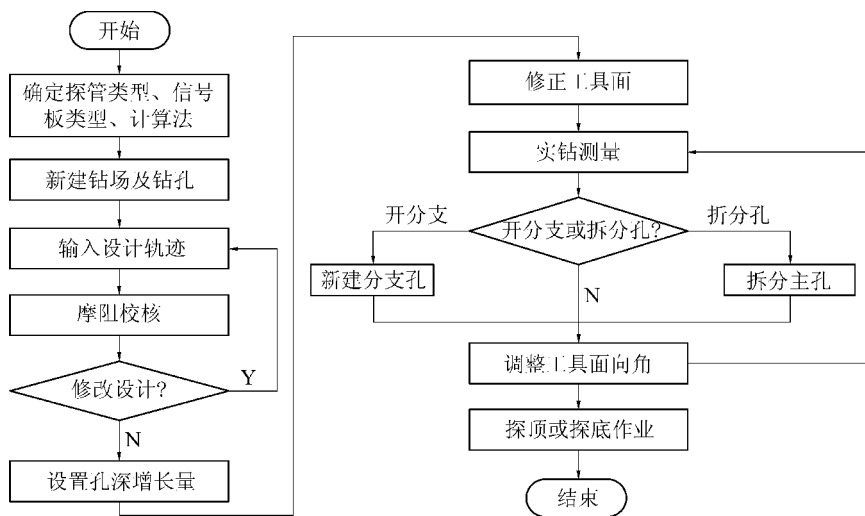


图4 随钻测量模块操作流程

Fig.4 Operation flow of MWD module

## 2.3 钻孔数据处理模块

钻场数据处理模块是对实钻数据的深层处理,主要应用于对钻孔的精确控制与孔群的管理,从实钻测量开始,可选择模块中各功能操作,最终通过调整工具面向角回归到实钻测量操作,其操作流程及数据流向如图5所示。

1) 轨迹预测与控制。轨迹预测是直接利用实钻轨迹进行数学建模,结合螺杆马达弯曲角度,寻找工具面向角与倾角、方位角之间的关系,预测倾角、方位角增长量,最终通过轨迹计算方法转化为预测钻孔轨迹的三维坐标。在预测完成后,可选择设计轨迹或者靶点作为控制目标,计算预测值与目标点之间的距离差、倾角差、方位角差,综合3种参数选择最佳的逼近方式,实现对钻孔走势的精确控制。

2) 孔群的三维管理。针对钻孔的三维管理,首

先在一个钻场中规定一个基准——零点钻孔,该钻孔的孔口坐标为绝对零点(0,0,0);其他孔口坐标为孔口与绝对零点之间的位移,规定上正下负、左正右负。这样就将一个钻场中所有钻孔置于同一个坐标系中,方便三维空间中进行孔群管理。

3) 防碰雷达预判。防碰雷达的功能主要通过三维空间距来实现。其过程为首先预测钻头位置坐标,然后在钻头位置处进行垂直水平位移的切片,与各钻孔轨迹形成切点。当已完成钻孔的切点与当前施工钻孔钻头之间的距离小于阈值时,视为存在串孔的可能,比较危险,提醒施工人员及时调整钻孔轨迹趋势。

4) 钻孔轨迹摩阻计算。通过对钻柱微单元段受力分析,建立钻具摩擦阻力数学模型,推导出给进和起拔等不同工况下的摩阻力计算公式,实时呈现当前孔深对应的摩阻力,指导定向钻进施工。

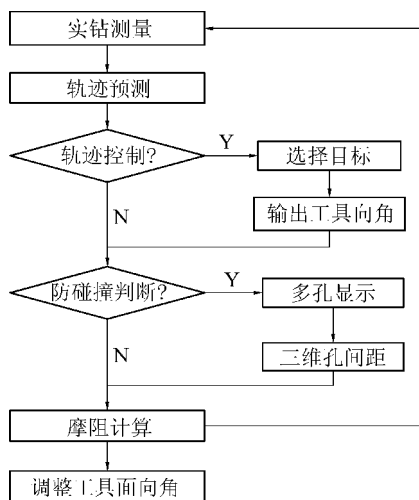


图5 钻孔数据处理模块操作流程

Fig.5 Operation flow of borehole data processing module

## 2.4 监测诊断模块

监测诊断模块是对钻机状态参数的监测,并依据监测结果做出相应的诊断处理,其数据来源与测量探管无关,数据流向也独立形成一套循环过程,如图6所示。

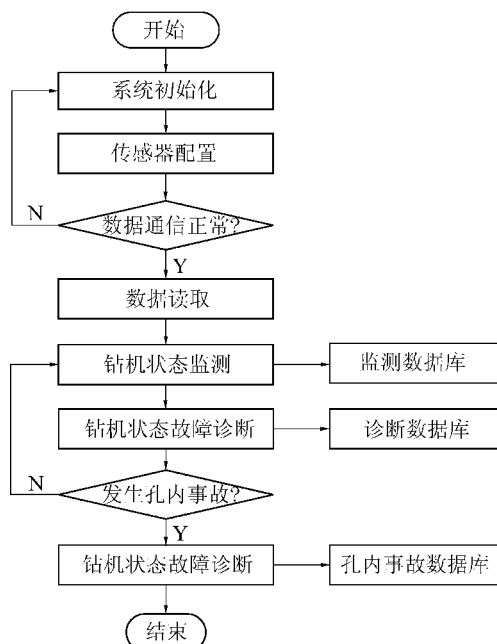


图6 钻机监测诊断模块数据传递流程

Fig.6 Data transmitting flow of monitoring and diagnosis module for drilling rig

1) 钻机状态监测。通过压力、流量、角度、速度、液位、温度等传感器对钻机的15个状态参数进行有效监测;主泵压力、副泵压力、给进压力、起拔压力、机身倾角、机身方位角、转速、转矩、回转压力、回油压力、泥浆泵压力、泥浆泵流量、钻进速度、液位、

油温。这些参数是定向钻机施工过程中关键零部件和部位的输出,可直接反映钻机的运行状态。

2) 钻机故障诊断。利用钻机的监测参数,基于单个参数和多个参数联合识别钻机的常见故障,提供相应的维修建议。

3) 孔内事故监测。当出现或者可能出现孔内事故时,可自动或手动记录钻机状态参数,并标记孔内事故,方便后续的数据分析和事故溯源。

4) 监测数据管理。监测数据管理主要是对监测数据库、诊断数据库和孔内事故数据库3个部分数据的有效管理。

基于串口通信协议主要在程序后台运行,保证数据的正确传输。随钻测量模块覆盖探管测量的所有操作;钻孔数据处理模块显示钻孔轨迹的精确控制。监测诊断模块识别钻机状态,诊断设备故障。

## 3 现场试验

### 3.1 寺河矿现场试验

2016年10月在阳泉寺家庄煤矿进行现场试验,试验设备为:ZDY6000LD型钻机、YZG127随钻测量探管、 $\phi 73$  mm通缆钻杆、 $\phi 73$  mm上/下无磁钻杆、 $\phi 96$  mm PDC钻头、 $\phi 73$  mm单弯螺杆马达等。

在该钻场进行3号孔、4号孔2个钻孔施工,其中3号孔钻深528 m,4号孔钻深456 m。2个钻孔孔口的左右位移为20 m,上下位移为0.1 m。因此,以3号孔为零点钻孔,其孔口坐标为(0,0,0),4号孔钻孔孔口坐标为(0,20,0.1)。2个钻孔的空间分布如图7所示,可真实反映出2个钻孔的轨迹趋势与空间分布。

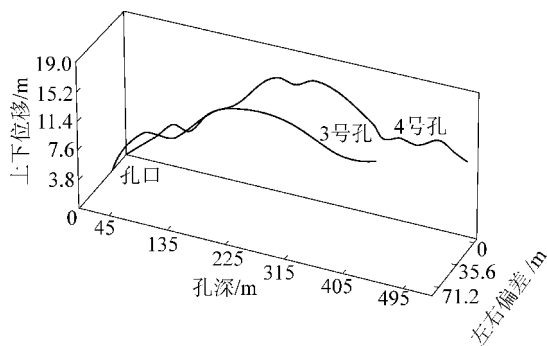


图7 寺河矿施工钻孔空间分布

Fig.7 Space distribution for borehole construction of Sihe Coal Mine

### 3.2 黄陵二矿现场试验

2016年9月在陕煤黄陵二号井进行瓦斯抽采

孔施工, 试验设备 ZDY6000LD (F) 型钻机搭载 YZG127 随钻测量装置。

在该钻场进行 1 号孔、2 号孔、3 号孔 3 个钻孔进行施工。其中 1 号钻孔和 2 号钻孔孔深均为 300 m, 3 号钻孔孔深 306 m。在钻探施工过程中, 重点对随钻测量模块和钻孔数据处理模块进行测试, 实验结果表明软件运行稳定、功能全面, 操作简单, 易于现场工人使用。

## 4 结 论

1) 研制了随钻测量及钻孔数据处理软件, 具有随钻测量、钻孔数据处理、钻机监测诊断等功能, 可实现对探管数据解析、钻孔轨迹实时探测、钻孔轨迹数据的深度挖掘、钻机状态的实时监测与故障诊断。

2) 该软件解决了多种硬件通信的适应性、施工工艺的适应性、钻孔轨迹的精确控制、钻孔防碰处理以及钻机的监测诊断等问题, 可满足施工现场各种层次的需求。

3) 现场试验证明, 随钻测量及钻孔数据处理软件通信稳定、测量准确、功能全面、操作简单, 可使钻孔施工人员更加全面掌握施工信息, 提高施工效率。

## 参考文献 (References):

- [1] 杨杰, 樊志伟, 徐红卫. 煤矿井下钻进钻孔随钻测量技术研究进展[J]. 煤炭与化工, 2016, 39(8): 145-149.  
YANG Jie, FAN Zhiwei, XU Hongwei. Research progress of underground drilling measurement technology [J]. Coal and Chemical Industry, 2016, 39(8): 145-149.
- [2] 石智军, 李泉新, 姚克. 煤矿井下 1800m 水平定向钻进技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 109-113.  
SHI Zhijun, LI Quanxin, YAO Ke. Underground mine 1 800 m horizontal directional drilling technology and equipment [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 109-113.
- [3] 石智军, 许超, 李泉新, 等. 随钻测量定向钻进技术在煤矿井下地质勘探中的应用[J]. 煤矿安全, 2014, 45(12): 136-140.  
SHI Zhijun, XU Chao, LI Quanxin, et al. Application of MWD directional drilling technology in geologic exploration in underground coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(12): 136-140.
- [4] 石智军, 胡少韵, 姚宁平, 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: 1-5.
- [5] 江泽宇, 谢洪波, 文广超, 等. 煤矿井下电磁波无线随钻轨迹测量系统设计与应用[J]. 煤炭地质与勘探, 2017, 45(3): 156-161.  
JIANG Zeyu, XIE Hongbo, WEN Guangchao, et al. Design and application electromagnetic radio MWD of drilling track in coal mine [J]. Coal Geology and Exploration, 2017, 45(3): 156-161.
- [6] 雷晓荣, 程建远, 陈龙, 等. 螺旋钻进随钻轨迹测量技术与装

- 备研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9): 140-144.  
LEI Xiaorong, CHENG Jianyuan, CHEN Long, et al. Study on measurement technology with drilling track and equipment of spiral drilling [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9): 140-144.
- [7] 石浩, 张杰. 煤矿井下精确定向探放水技术[J]. 煤矿安全, 2015, 46(2): 64-67.  
SHI Hao, ZHANG Jie. Accurate directional water detection and water release technology for underground coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(2): 64-67.
- [8] 燕斌. 基于数字磁通门的中心通缆随钻测量系统的研制[J]. 能源与环保, 2017, 39(5): 65-69.  
YAN Bin. Development of central type cable MWD system based on digital magnetic flux gate [J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(5): 65-69.
- [9] 王明哲, 刘宗伟, 许春雨, 等. 基于 ARM 的煤矿井下定向钻机随钻测量系统[J]. 煤矿安全, 2016, 47(11): 107-110.  
WANG Mingzhe, LIU Zongwei, XU Chunyu, et al. Measurement while drilling system for directional drilling machine of underground coal mine based on ARM [J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(11): 107-110.
- [10] 王国震, 黄麟森, 傅双玲. 随钻测量系统故障诊断装置[J]. 计算机系统应用, 2014, 23(7): 263-266.  
WANG Guozhen, HUANG Linsen, FU Shuangling. Fault diagnosis device for MWD [J]. Computer System and Application, 2014, 23(7): 263-266.
- [11] 方俊, 石智军, 李泉新, 等. 新型煤矿井下定向钻进有线随钻测量装置[J]. 工矿自动化, 2015, 41(8): 1-5.  
FANG Jun, SHI Zhijun, LI Quanxin, et al. Novel cable measurement while drilling device used for directional drilling in coal mine [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(8): 1-5.
- [12] 桂芳茹. 煤矿井下随钻测量技术研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(7): 131-133.  
GUI Fangru. Research on coal mine MWD technology [J]. Coal Technology, 2015, 34(7): 131-133.
- [13] 曾来. 一种用于松软煤层筛管工艺的钻孔轨迹随钻测量系统的研究[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(3): 27-29.  
ZENG Lai. Study on a drilling trajectory measurement system used in soft coal seam of sieve tube decentralization technology [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2018, 44(3): 27-29.
- [14] 廖少波. 电磁随钻测量技术的发展探讨[J]. 石化技术, 2016(2): 60-61.  
LIAO Shaobo. Discussion on the development of electromagnetic measurement-while-drilling technology [J]. Petrochemical Industry Technology, 2016(2): 60-61.
- [15] 张春华, 刘广华. 随钻测量系统技术发展现状及建议[J]. 钻采工艺, 2010, 33(1): 31-35.  
ZHANG Chunhua, LIU Guanghua. Present situation and suggestion of technology development of measurement while drilling [J]. Drilling and Production Technology, 2010, 33(1): 31-35.

- (6):946-950.
- [9] 王鹏飞.煤矿乏风低浓度瓦斯热逆流氧化理论及实验研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [10] 高虹宇,宋进国.矿井井筒防冻方式的比较[J].煤炭工程,2004(4):13-14.  
GAO Hongyu, SONG Jinguo. Comparison of anti freezing methods of mine shaft [J]. Coal Engineering, 2004(4):13-14.
- [11] 闵彦.井筒防冻采用热风炉的优越性[J].煤炭工程,2005(2):19-20.  
MIN Yan. Superiority of hot blast furnace for anti freezing in mine shaft [J]. Coal Engineering, 2005(2):19-20.
- [12] 高鹏飞,霍春秀,孙东玲.瓦斯蓄热氧化加热井筒方法研究[J].能源与环保,2017,39(6):52-56.  
GAO Pengfei, HUO Chunxiu, SUN Dongling. Study on shaft heating method by coal mine methane regenerative thermal oxidation [J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(6):52-56.
- [13] 陈金华.低浓度瓦斯蓄热氧化供热系统的应用研究[J].矿业安全与环保,2017,44(2):62-65.  
CHEN Jinhua. Application research of low-concentration gas regenerative oxidation and heating system [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2017, 44(2):62-65.
- [14] 谢鹏娟.煤矿风井场地低瓦斯蓄热氧化井筒加热系统设计浅析[J].能源与节能,2017(8):13-14.  
XIE Pengjuan. Analysis of heating system design for low gas heat storage oxidation wellbore in air shaft site in coal mine [J]. Energy and Energy Conservation, 2017(8):13-14.
- [15] 王广宏.基于瓦斯氧化技术的井筒加热系统[J].煤矿安全,2017,48(4):107-110.  
WANG Guanghong. Shaft heating system based on gas oxidation technology [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(4):107-110.
- [16] KURNIA J C, XU P, SASMITO A P. A novel concept of enhanced gas recovery strategy from ventilation air methane in underground coal mines; a computational investigation [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 35:661-672.
- [17] 韩甲业,应中宝.我国低浓度煤矿瓦斯利用技术研究[J].中国煤层气,2012,9(6):39-41.  
HAN Jiaye, YING Zhongbao. Study on utilization technologies of low concentration CBM [J]. China Coalbed Methane, 2012, 9(6):39-41.
- [18] 吴立新,赵路正.煤矿区煤层气开发利用制约因素与发展建议[J].洁净煤技术,2014,20(5):24-27,52.  
WU Lixin, ZHAO Luzheng. Restrictive factors and development suggestions of coalbed methane extraction and utilization [J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(5):24-27, 52.

(上接第200页)

- [16] 代晨昱,燕斌,樊依林,等.基于定向钻进技术的随钻测量系统应用研究[J].能源与环保,2017,39(7):214-217.  
DAI Chenyu, YAN Bin, FAN Yilin, et al. Research on application of drilling measurement system based on directional drilling technology [J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(7):214-217.
- [17] 黄麟森,张先韬.回转钻进随钻测量装置数据处理软件设计[J].工矿自动化,2015,41(7):112-114.  
HUANG Linsen, ZHANG Xiantao. Design of data processing software of measurement device while drilling for rotary drilling [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(7):112-114.
- [18] 李淑健.基于WPF的煤矿随钻测量软件设计与开发[J].煤矿机械,2017,38(4):16-18.  
LI Shujian. WPF based software design and development on coal mine MWD data processing [J]. Coal Mine Machinery, 2017, 38(4):16-18.
- [19] 陈文辉,双凯.基于LabVIEW的连续油管随钻测量监控软件设计[J].电子设计工程,2014,22(21):70-73.  
CHEN Wenhui, SHUANG Kai. Monitoring software design for measurement while coiled tube drilling based on LabVIEW [J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(21):70-73.
- [20] 方娟.基于LabVIEW的实时信号处理软件在随钻测量系统上的设计与应用[J].石油管材与仪器,2016,2(3):24-27.  
FANG Juan. Design and application of real-time signal processing software based on LabVIEW in MWD system [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2016, 2(3):24-27.