

文章编号: 1001-1986(2017)05-0167-06

基于离线编程的煤层智能定向钻进技术

杨明军, 文国军, 王玉丹, 许新建, 吕仲林

(中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 定向钻进技术目前被广泛应用于煤层气的开采中。为了提高煤层气开采的质量和效率, 必须提高煤层定向钻进过程的智能化水平。通过煤层定向钻进的三维离线编程系统, 获取钻进轨迹的控制参数, 并利用该系统自动生成的钻具控制程序, 钻进过程中根据设计钻进轨迹与实际的钻进轨迹的偏差进行自动纠偏, 从而实现煤层定向钻进的智能化。

关键词: 离线编程; 定向钻进; 智能控向; 自动纠偏

中图分类号: TE21, TE249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2017.05.029

Research on off-line programming-based intelligent directional drilling technology of coal seam

YANG Mingjun, WEN Guojun, WANG Yudan, XU Xinjian, LYU Zhonglin

(School of Mechanical Engineering & Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Directional drilling is one of the high-tech in CBM. In order to implement scientific development and utilization, increase the quality and efficiency of CBM exploitation, it is necessary to improve the intelligent level of the directional drilling process. Through the three-dimensional off-line programming system of coalbed directional drilling, the control parameters of the drilling trajectory are obtained and the drilling control program is automatically generated. At the same time it can rectify according to the deviation between actual track and designed one automatically to achieve intelligent control during directional drilling.

Keywords: off-line programming; directional drilling; intelligent orientation; automatic correction

我国蕴藏着非常丰富的煤层气资源, 总储藏量约 36.8 万亿 m^3 , 居世界第 3 位^[1-3]。煤层气作为近一二十年在世界上崛起的洁净、优质能源和化工原料, 国际上主要的产煤国家都十分重视对煤层气的开采。随着定向钻进技术、精确随钻测量技术、多分支孔钻井技术、压裂技术等新技术在钻进领域的逐步应用, 我国在煤层气勘探与开发上的研究已经步入了世界煤层气产业的前列。但我国的煤层气产业仍然面临着诸多技术难题, 基础理论研究和技术创新不够, 且现有的许多理论和技术大都是应用于油气开采, 在煤层气钻井中不能简单地直接移植和应用, 故在实际钻进中因为缺乏针对性而没能全面推广和生效^[4-6]。此外, 为了实现对煤层气规模化的开采, 对钻井技术和设备的性能提出了更高的要求,

只有实现钻井设备的智能化方可胜任, 这是未来钻井设备和技术发展方向的必然趋势, 也是国际钻井设备和技术发展的总趋势^[7]。

智能钻进是指安装在钻头附近或钻头内部的随钻测量装置通过各类传感器技术对岩石特征、钻具姿态参数、钻机工作参数等进行实时检测, 得到实时钻进轨迹参数和地层信息, 钻机控制器按照得到的参数信息对钻进状态进行控制。然而, 智能化钻井目前还处于研究试验阶段, 尽管国内外大量的技术专家都在对智能化钻井技术进行研究和探索, 但目前都没有取得实质性的进展, 仅在部分功能上实现了智能化, 远远没能实现钻进工艺的全面智能化。

精确的轨迹控制技术是实现智能化钻进的关键

收稿日期: 2016-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272174, 41672155)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(41272174, 41672155)

第一作者简介: 杨明军(1992—), 男, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 从事煤层气、机器视觉等方面的研究工作. E-mail: yang_ming_jun@163.com

通讯作者: 文国军(1978—), 男, 四川广安人, 博士, 教授, 从事煤层气、智能地质装备等方面的研究工作. E-mail: wenguojun@cug.edu.cn

引用格式: 杨明军, 文国军, 王玉丹, 等. 基于离线编程的煤层智能定向钻进技术[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(5): 167-172.

YANG Mingjun, WEN Guojun, WANG Yudan, et al. Research on off-line programming-based intelligent directional drilling technology of coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(5): 167-172.

和难点。目前的控向技术大多数都是利用随钻测量检测钻井信息,然后通过电缆、有芯钻杆等有线方式或者是电磁波、泥浆脉冲、声波等无线传输方式将实时检测到的钻进参数信息传输到孔口,操作人员通过对这些信息的分析与判断,然后采取相应措施进行钻进轨迹的控制,控向过程和质量往往依赖操作人员的经验,远未达到智能控向钻进的要求^[8-10]。为了达到提高煤层定向钻进过程的施工质量与成功率这一目标,必须能够精准地控制钻头钻进,使之沿着设计的轨迹运动,当实际的钻进轨迹与设计的钻进轨迹产生偏差时能够自动地对钻具进行纠偏,即实现煤层智能定向钻进^[11-12]。笔者将离线编程技术用于定向钻进的三维轨迹编程系统,通过该离线编程系统读取设计好的轨迹信息,并对轨迹的数据信息进行分析处理,生成适用于水力纠偏钻具控制系统的控制程序,钻进过程中当轨迹发生偏斜时自动纠偏,实现定向钻进轨迹的智能控向。

1 钻进轨迹信息提取

在早期的定向钻进过程中,因为钻井设备的限制,设计的钻进轨迹受到降低轨迹控制的难度和减少工作量这一制约,选用模型简洁、易于现场操作的二维钻进轨迹基本上可以满足钻进要求。但在地质条件比较复杂的煤层和深层的煤层开采煤层气,方位角的变化是经常性的,因此,三维钻进轨迹要比二维轨迹更具实际意义。目前定向钻进轨迹设计也更偏向于三维轨迹,其常见的孔身轨迹有直线-圆弧形式、直线-圆弧-圆弧形式、直线-圆弧-直线形式、直线-圆弧-直线-圆弧-直线等。通常用 AutoCAD 设计后都是保存为图形文件,但是本次所研究的系统在提取轨迹信息时所识别的是数据文件,所以在设计好轨迹后要保存为包含轨迹数据信息的 DXF 文件。DXF 格式文件也是 AutoCAD 文件格式的一种,因 DXF 文件的数据结构比较简单,对数据信息的提取比较方便,同时易于通过编程对其进行操作等优点而被广泛应用^[13]。因此,本次研究将 AutoCAD 设计的钻进轨迹文件存为 DXF 格式,使对轨迹数据的提取过程较为简单。DXF 文件的基本结构和常用的组码及其含义在文献^[14]中做了详述,在此不再赘述。因为与本研究相关的是煤层定向钻进的轨迹数据,所以,在提取 DXF 文件数据时不提取跟轨迹图形数据不相关的数据,例如轨迹的线型、颜色等。所提取的数据为 DXF 文件实体段中的钻进轨迹组合元素直线和圆弧。

基于 Visual Basic 编写的离线编程系统在读取 DXF 文件图形对象的数据时,事先无法确定图形对

象的数量,只能在提取的过程中逐行读取数据并与关键词进行比较来确定,比如 AcDbLine 和 AcDbCircle 分别为直线和圆弧的关键词。对于直线对象要分别查找其起点和终点的组码,进而提取其对应的坐标值。对于圆弧对象,提取的数据量较多,而且对处于不同平面的圆弧,其数据的存储格式也有所不同,由于整个钻进轨迹是一条空间曲线,平面圆弧的拉伸方向数据的默认值是(0,0,1),在 DXF 文件中它是不显示的,而当圆弧为空间圆弧时,其拉伸方向数据将出现变化并存储于 DXF 文件里。由于在 DXF 文件中直线和圆弧数据存储格式不同,在读取到数据后对其进行分类处理,并且调用 Visual Basic 的表格控件“MSFlexGrid”对数据进行显示。

2 钻进轨迹数据转换算法研究

2.1 圆弧轨迹数据分析与坐标转换

通过离线编程系统读取到的圆弧轨迹信息包括圆心坐标、圆弧半径、起始角度、终止角度以及拉伸方向,这些数据中空间圆弧轨迹的数据值并不是设计轨迹时的世界坐标系中的数据,而是将世界坐标系绕坐标原点进行旋转,使 XY 平面与圆弧轨迹所在平面平行时的新坐标系中的坐标数值。在 AutoCAD 中,圆弧默认方向为逆时针,起始角度和终止角度都是圆弧所在平面内的数据,拉伸方向构成一个单位向量,该向量的方向为新坐标系的 Z 轴方向。因为,在 DXF 文件中读取到的直线和平面圆弧轨迹数据与读取到的空间圆弧轨迹数据是两个坐标系中的数据,为了使圆弧轨迹的直线拟合过程更容易,在对圆弧段进行拟合前需要将读取到的空间圆弧的起点、终点和圆心的坐标值进行转换,使其变为与直线和平面圆弧处在相同坐标系中的数据。

如图 1 所示,坐标系 XYZ 为轨迹设计时选定的标准坐标系,即 AutoCAD 默认的世界坐标系。当 $X'Y'$ 平面与圆弧 AB 所在平面平行, Z' 轴正方向与圆弧的拉伸方向重合时,圆弧 AB 在坐标系 $X'Y'Z'$ 中的圆心坐标、起始角度和终止角度值与 DXF 文件中所存储的数据是一致的。

通过读取到的 DXF 文件数据,已知空间圆弧的圆心 O 点在 $X'Y'Z'$ 坐标系中的坐标为 (x_0', y_0', z_0') ,起始角度为 α 、终止角度为 β ,拉伸方向 $\vec{r} = (i, j, k)$,圆弧半径为 R,求圆弧端点在 XYZ 坐标系中的坐标 $A(x_1, y_1, z_1)$ 和 $B(x_2, y_2, z_2)$ 。拉伸方向 $\vec{r}$ 是将坐标系 $X'Y'Z'$ 中数据进行转换的一个重要参考量,其与 XYZ 坐标系的关系为:首先把坐标系 $X'Y'Z'$ 绕 X' 轴旋转

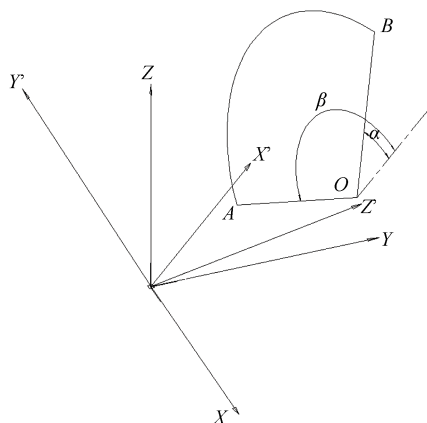


图1 圆弧轨迹坐标关系

Fig.1 Relation of arc trajectory coordinate

某一角度,使 Z' 还原到 Z 轴,旋转角度大小为向量

$$C = \begin{pmatrix} x^2(1-\cos\lambda) + \cos\lambda & xy(1-\cos\lambda) - z\sin\lambda & xz(1-\cos\lambda) + y\sin\lambda \\ xy(1-\cos\lambda) + z\sin\lambda & y^2(1-\cos\lambda) + \cos\lambda & yz(1-\cos\lambda) - x\sin\lambda \\ xy(1-\cos\lambda) - y\sin\lambda & yz(1-\cos\lambda) + x\sin\lambda & z^2(1-\cos\lambda) + \cos\lambda \end{pmatrix}$$

绕 X' 轴旋转 θ 角后计算 $A_1=CA'$ 和 $B_1=CB'$, 得到 A_1 、 B_1 两点的坐标分别为:

$$\begin{aligned} x_1'' &= x_1' \\ y_1'' &= y_1' \cos\theta - z_1' \sin\theta \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} z_1'' &= y_1' \sin\theta + z_1' \cos\theta \\ x_2'' &= x_2' \\ y_2'' &= y_2' \cos\theta - z_2' \sin\theta \end{aligned} \quad (4)$$

$$z_2'' = y_2' \sin\theta + z_2' \cos\theta$$

假设绕 Z' 轴旋转角度为 β , 则 $\beta = \arctan(i/j)$, 经过三角变换得到:

$$\begin{aligned} \sin\beta &= i / \sqrt{1-k^2} \\ \cos\beta &= -j / \sqrt{1-k^2} \end{aligned} \quad (5)$$

同理计算 $A=CA_1$ 和 $B=CB_1$, 得到点 A_1 、 B_1 绕 Z' 轴旋转后 A 、 B 两点的坐标分别为:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_1'' \cos\beta - y_1'' \sin\beta \\ y_1 &= x_1'' \sin\beta + y_1'' \cos\beta \\ z_1 &= z_1'' \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= x_2'' \cos\beta - y_2'' \sin\beta \\ y_2 &= x_2'' \sin\beta + y_2'' \cos\beta \\ z_2 &= z_2'' \end{aligned} \quad (7)$$

将式(1)—式(5)分别代入式(6)和式(7)可得出 A 、 B 两点在 XYZ 坐标系中的坐标值。

2.2 钻进轨迹 Matlab 拟合算法研究

对轨迹数据进行读取、分类和转换处理结果如图2所示。通过上述计算得到的世界坐标系里空间圆弧轨迹数据进行了比较复杂的坐标转换处理,而且坐标值都是进行了四舍五入处理。而定向钻进轨迹拟合的方法是将各段直线和圆弧的起点 X 坐标按

$\vec{r}$ 与向量 $(0,0,1)$ 的夹角;然后绕 Z 轴旋转角度 $\arctan(i/j)$ 得到世界坐标系 XYZ 。

明确坐标系的关系后,下面计算 A 、 B 在世界坐标系中的坐标值。假设 A 、 B 两点在 $X'Y'Z'$ 中的坐标分别为 $A'(x_1', y_1', z_1')$ 和 $B'(x_2', y_2', z_2')$, 则:

$$x_1' = R \cos\alpha + x_0'; y_1' = R \sin\alpha + y_0'; z_1' = z_0' \quad (1)$$

$$x_2' = R \cos\alpha + x_0'; y_2' = R \sin\alpha + y_0'; z_2' = z_0' \quad (2)$$

然后将 A' 、 B' 两点分别进行坐标旋转变换,首先拉伸方向向量 $\vec{r}$ 与向量 $(0,0,1)$ 夹角为 $\theta = \arccos \vec{r} \cdot (0,0,1) / |\vec{r}|$ 。
 $|(0,0,1)| = \arccos k$ 。

在三维空间里已知旋转角度,一个点绕一个任意矢量 (x,y,z) 旋转角度 λ 后的新坐标可通过左乘下式矩阵 C 得到。

升序排列,然后进行轨迹首尾相连。因为坐标点很难做到完全重合,这样首尾相连得到的定向钻进轨迹就会出现断点,所以为了得到完整的定向钻进轨迹,需对转换得到的空间圆弧坐标数据做进一步处理,具体处理流程如图3所示。

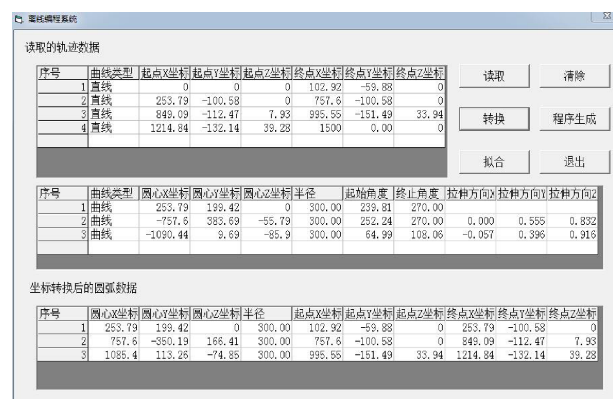


图2 钻进轨迹数据处理结果

Fig.2 Processing result of drilling trajectory data

在实际钻进过程中,钻杆只能产生较小的变形,因此设计的钻进轨迹中的圆弧段必须要分解为若干的直线段来进行拟合,整个圆弧的弯曲变形量被平均分配给各个钻杆。同时在 Matlab 中对圆弧轨迹进行拟合也需要进行插值,插值数量根据圆弧特征与圆弧长度确定。

如图4所示,弧线 AB 为其中一段圆弧轨迹, O 点为圆心,半径为 R , α 、 β 分别为起始角度和终止角度。用若干直线段来拟合圆弧 AB 时,假设拟合线段长为 L ,从 A 点开始依次为 AC 、 CD 、.....

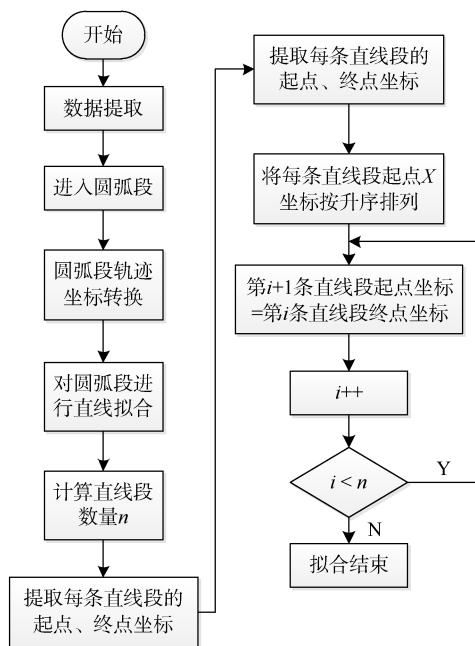


图3 数据处理流程图
Fig.3 Flowchart of data processing

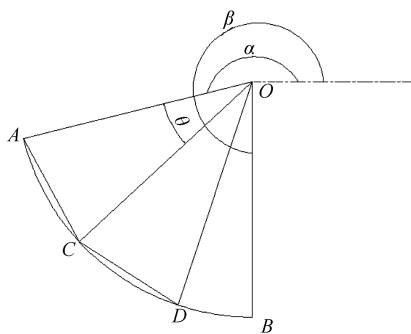


图4 圆弧轨迹插值原理示意图
Fig.4 Interpolation principle of arc trajectory

通过圆弧起始角度、终止角度以及半径可以得到弧线 AB 的长度:

$$l_{AB} = (\beta - \alpha) \pi R / 180$$

一般来说,对于钻进轨迹的圆弧半径 R 远大于拟合线段长度 L ,因此有 $l_{AB} = L_{AC}$,从而插值点数为

$$N = l_{AB} / L = (\beta - \alpha) \pi R / 180L$$

最后对 N 的值取整即得到需要插值的点数。得到一组空间点的坐标后,调用 Matlab 的三维图形绘制命令“Plot3”对圆弧段进行拟合,得到圆弧轨迹图形。拟合之后结果如图 5 所示。

3 钻具控制程序生成算法研究

3.1 钻具控制系统

在定向钻进过程中,尤其是钻进轨迹达到一定深度后,容易出现实际钻进轨迹与设计的钻进方向发生偏斜的现象。水力纠偏技术是一种应用于煤层气开采的借助水力对钻进方向进行纠正的技术,其

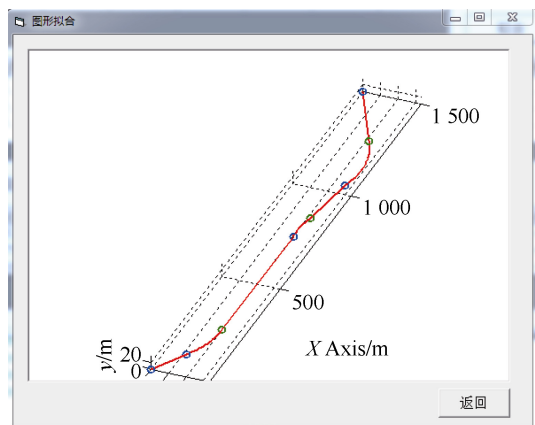


图5 钻进轨迹拟合结果示意图
Fig.5 Results of drilling trajectory fitting

基本原理是通过一定装置控制钻井泵水流的喷射方向,用水力破碎钻具偏斜的反方向煤岩,使该部分的煤岩变“软”,从而引导钻进方向趋向于变软的煤岩一侧,实现了钻进方向的人为干涉,达到纠偏效果^[15-16]。本次研究的钻具控制系统采用水力纠偏技术实现自动纠偏的功能。水力纠偏钻具控制系统结构图如图 6 所示。

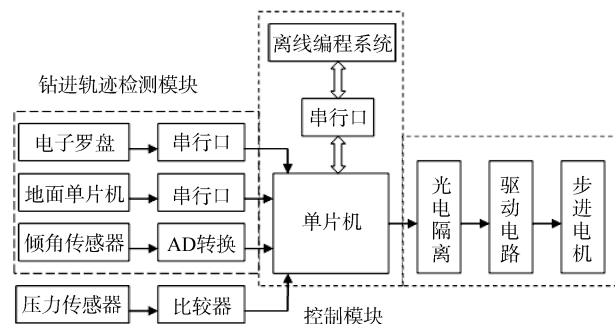


图6 钻具控制系统结构图
Fig.6 Structure diagram of control system of drilling tool

在整个钻具控制系统中,首先将离线编程系统生成的控制程序下载到单片机系统,将数据与检测模块中采集到的数据进行对比,进而控制电机驱动部分实现纠偏钻进。

3.2 钻具控制程序总体流程

安装好钻具控制器后开始钻进时,控制系统最初处于低功耗状态,在整个钻进过程中,通过传感器检测钻进时的水压大小,将其值与设定的水压值进行比较,然后给控制系统提供纠偏信号。多次采集井斜角与方位角数据,通过对前后两次采集到的数据进行对比,判断钻具是否稳定。当系统稳定后,控制系统会循环采集方位角和井斜角数据,并通过系统的自动判断对数据进行排序并滤除错误数据,最后将数据存储到存储器中,同时计算步进电机的旋转角度并传送到步进电机驱动部分。

3.3 纠偏点的确定

首先设定实际钻进轨迹允许的最大偏斜量为 H , 在实际钻进过程中, 当钻进轨迹偏斜量达到设定阈值后, 必须进行纠偏钻进。由于受到钻杆的弯曲刚度限制, 实际钻进轨迹曲线应该是光滑连续可微的曲线, 如果在实际偏斜量达到最大偏斜量 H 后开始纠偏, 则实际钻进轨迹必然不会符合设计要求, 所以需要找出最佳的轨迹纠偏点。

确定最佳纠偏点的原理如图 7 所示, 设计的钻进轨迹为 L , 所允许的最大偏斜量 H 条件下的极限轨迹为 L_1 、 L_2 , 设 L 段为水平段, 则 A 点的井斜角为 0° 。设 B 点为最佳纠偏点, 则钻进轨迹会以 B 点为拐点, 按照曲线 A_3 的轨迹进行钻进, 其中 h 为 B 点的实际偏斜量, 点 O_1 和 O_2 分别为圆弧 A_1 和 A_3 的圆心, 半径为 R , 由钻杆的最大弯曲强度决定, B 点的井斜角为 θ_1 , 圆弧 A_1 和圆弧 A_3 在 B 点相切。

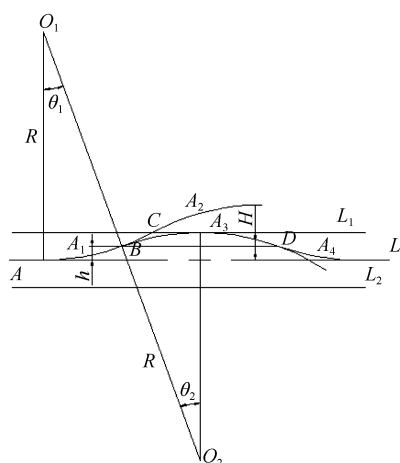


图 7 最佳纠偏点原理图

Fig.7 Principle of the best rectifying point

由轨迹的几何关系可以得到 B 点的井斜角 θ 和偏斜量 h 的值为

$$\theta = \theta_1 = \theta_2 = \arccos(R - H/2)/R = \arccos(2R - H)/2R$$

$$h = H/2$$

因此, 在垂直投影面上保证钻头进行正常钻进的井斜角 θ 和偏斜量 h 应该满足如下条件:

$$-\arccos(2R - H)/2R < \theta < \arccos(2R - H)/2R \quad (8)$$

$$-H/2 < h < H/2$$

同理, 在水平投影面上保证钻头进行正常钻进的方位角 β 和偏斜量 d 应该满足如下条件:

$$-\arccos^{-1}(2R - H)/2R < \beta < \arccos^{-1}(2R - H)/2R \quad (9)$$

$$-H/2 < d < H/2$$

综上所述, 只有当钻具的位置参数满足式(8)和式(9)时, 实际的钻进轨迹将在允许的误差范围内沿着设计轨迹钻进, 否则, 钻具控制系统就会发出纠

偏信号, 开始纠偏钻进。

3.4 自动生成钻具控制程序算法研究

根据钻具控制程序流程, 结合在该三维离线编程软件系统计算得到的各钻进轨迹控制点的坐标值及方位角、井斜角和纠偏条件等信息, 可以在本文研究的三维离线编程系统软件上生成煤层实际钻进所需要的控制程序。

在 Visual Basic 程序中用“CommonDialog”控件对文件进行存储操作。由于生成的控制程序还要用其它软件进行处理生成可执行文件, 为了方便数据交换, 在保存控制程序时需要输入文件名和后缀名“.C”并选择保存路径。程序运行后如图 8 所示^[16]。

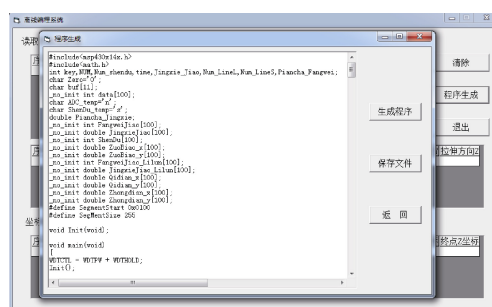


图 8 程序运行图

Fig.8 Program run diagram

通过对不同设计轨迹生成的钻具控制程序进行比较可以发现, 其轨迹控制语句基本相同, 控制参数根据轨迹形状的不同有所改变, 同时对于含有分支孔的设计轨迹生成的钻具控制程序增加倒杆信号控制语句。

4 结论

a. 开发的定向钻进的三维离线编程系统, 实现了对轨迹文件中控制参数进行提取、存储和对轨迹进行重绘的目标, 并能够自动生成钻具控制程序。

b. 推导了定向钻进的轨迹纠偏算法, 在给定最大允许偏斜量 H 时, 得到了最佳纠偏点的井斜角、方位角和偏斜量的条件, 利用钻具控制程序, 当实际钻轨迹与设计轨迹产生偏斜时, 能够进行自动纠偏。但由于煤层的智能定向钻进尚处于理论研究阶段, 目前的钻具、随钻测量系统、轨迹控制方法等并不能真正地满足现场实验的条件, 致使研究成果还未能在现场进行应用。

参考文献

- [1] 孙茂远, 范志强. 中国煤层气开发利用现状及产业化战略选择[J]. 天然气工业, 2007, 27(3): 1-5.
- SUN Maoyuan, FAN Zhiqiang. The status quo of China's CBM

- development and utilization and the choice of its industrialization strategy[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(3): 1-5.
- [2] 叶建平. 我国煤层气产业发展报告[C]//2011 年煤层气学术研讨会论文集. 厦门: 地质出版社, 2011: 3-9.
- [3] 许月. 煤层气发展将进入新阶段[N]. 中国石化报, 2010-01-11(5).
- [4] 韩宝宝. 用煤层气作为燃料对节能减排的意义[J]. 科技情报开发与经济, 2011, 21(23): 167-169.
HAN Baobao. Significance of coalbed gas as fuel for energy saving and emission reduction[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2011, 21(23): 167-169.
- [5] 穆福元, 贾承造, 穆涵宜. 中国煤层气开发技术的现状与未来[J]. 中国煤层气, 2014, 11(4): 3-5.
MU Fuyuan, JIA Chengzao, MU Hanyi. Current situation and future of the coalbed methane development technology in China[J]. China Coalbed Methane, 2014, 11 (4): 3-5.
- [6] 司光耀, 蔡武, 张强. 国内外煤层气利用现状及前景展望[J]. 中国煤层气, 2009, 6(2): 44-46.
SI Guangyao, CAI Wu, ZHANG Qiang. Status quo and prospect of CBM utilization at home and abroad[J]. China Coalbed Methane, 2009, 6(2): 44-46.
- [7] 唐志军, 韩来聚, 刘新华. 自动化智能化钻井技术进展[J]. 石油地质与工程, 2009, 23(1): 93-97.
TANG Zhijun, HAN Laiju, LIU Xinhua. Progress of automation and intelligent drilling technology[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2009, 23(1): 93-97.
- [8] ROYAL A C D, RIGGALL T J, CHAPMAN D N. Analysis of steering in horizontal directional drilling installations using down-hole motors[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(6): 754-765.
- [9] MONTEIRO S T, RAMOS F, HATHERLY P. Conditional random fields for rock characterization using drill measurements[C]//8th International Conference on Machine Learning and Applications. Miami Beach: IEEE Computer Society, 2009: 366-371.
- [10] 肖仕红, 梁政. 智能钻井电缆信号传输的研究现状及难点[J]. 石油矿场机械, 2007, 36(2): 7-10.
XIAO Shihong, LIANG Zheng. The current status and difficulty of research on the wired[J]. Oil Field Equipment, 2007, 36(2): 7-10.
- [11] 何广忠. 机器人弧焊离线编程系统及其自动编程技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [12] 刘金玮, 胡淑娟. 未来的智能钻井技术[J]. 国外油田工程, 2008, 24(2): 39-41.
LIU Jinwei, HU Shujuan. Future intelligent drilling technology[J]. Foreign Oilfield Engineering, 2008, 24(2): 39-41.
- [13] 张成才, 孙喜梅, 朱陶业. AutoCAD 的 DXF 文件格式及其转换接口研究[J]. 微型电脑应用, 2001, 17(8): 54-55.
ZHANG Chengcai, SUN Ximei, ZHU Taoye. DXF file format and conversion interface of AutoCAD[J]. Microcomputer Applications, 2001, 17(8): 54-55.
- [14] 陈浩, 陈宏. 解读 AutoCAD 的 DXF 文件[J]. 贵州科学, 2002, 20(4): 125-127.
CHEN Hao, CHEN Hong. Explore DXF AutoCAD[J]. Guizhou Science, 2002, 20(4): 125-127.
- [15] 文国军. 煤层气近水平孔钻进原位探测与水力纠偏技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2008.
- [16] 洪利, 章扬, 李世宝. MSP430 单片机原理与应用实例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 40-45.

(责任编辑 聂爱兰)

(上接第 166 页)

- [21] CHRISTIANSEN A V, AUKEN E. Optimizing a layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data using Broyden's update and 1D derivatives[J]. Journal of Applied Geophysics, 2004, 56(4): 247-261.
- [22] 胡祖志, 胡祥云, 何展翔. 大地电磁非线性共轭梯度拟三维反演[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1226-1234.
HU Zuzhi, HU Xiangyun, HE Zhanxiang. Pseudo-Three-Dimensional magnetotelluric inversion using nonlinear conjugate gradients[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(4): 1226-1234.
- [23] 胡祖志. 大地电磁拟三维反演研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2005.
- [24] 米萨克 N. 纳比吉安. 勘查地球物理电磁法[M]. 赵经祥, 等, 译. 北京: 地质出版社, 1992.
- [25] GUPTASARMA D, SINGH B. New digital linear filters for Hankel J_0 and J_1 transforms[J]. Geophysical Prospecting, 1997, 45(5): 745-762.
- [26] 朴化荣, 殷长春. 利用 G-S 逆拉氏变换法计算瞬变测深正演问题[J]. 物化探计算技术, 1987, 9(4): 295-302.
PIAO Huarong, YIN Changchun. Calculation of transient EM sounding using the Gaver-Stehfest inverse Laplace transform method[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1987, 9(4): 295-302.
- [27] 罗延坤, 昌彦君. G-S 变换的快速算法[J]. 地球物理学报, 2000, 43(5): 684-690.
LUO Yanzhong, CHANG Yanjun. A rapid algorithm for G-S transform[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(5): 684-690.
- [28] FARQUHARSON C G, OLDENBURG D W. Inversion of time-domain electromagnetic data for a horizontally layered earth[J]. Geophysical Journal International, 1993, 114(3): 433-442.

(责任编辑 聂爱兰)