

煤矿坑道钻机开孔定位参数自动调节系统研究

李 晓 鹏

(中煤科工集团西安研究院有限公司 钻探技术研究所, 陕西 西安 710077)

摘 要:为实现精确调节煤矿坑道钻探钻机姿态,以满足钻孔设计的方位角、高度和角度等定位参数,确保钻孔走向精度,利用智能控制技术、电液比例控制技术,设计了煤矿坑道钻机开孔定位参数自动调节系统。基于钻机变幅机构的运动学模型,研究钻机的开孔定位调节控制原理及控制策略,基于控制需求设计了系统软硬件。试验表明:所设计的煤矿坑道钻机开孔定位参数自动调节系统,可以根据操作人员输入的参数,自动完成钻机开孔定位参数的调节,参数误差可以控制在钻孔施工许可的范围之内,相对于人工调节,该系统操作安全便捷,提高了工作效率。

关键词:坑道钻机;钻孔;超前钻探;巷道掘进

中图分类号:TD41 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)07-0112-06

Study on automatic control system of borehole positioning parameters for mine roadway drilling rig

Li Xiaopeng

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

Abstract: In order to realize an accurate attitude alignment of an exploration drilling rig in a coal mine roadway, and to meet the designed azimuth, height, angle and other positioning parameters and to ensure the strike accuracy of the borehole, an intelligent control technology and electro-hydraulic proportional control technology were applied to design the automatic control system of the borehole positioning parameters for the drilling rig in the coal mine roadway. Based on the kinematics model of the luffing mechanism in the drilling rig, a study was conducted on the positioning adjustment control principle and control strategy of the borehole drilling. Based on the control requirements, a system software was designed. The test showed that the designed the automatic control system of the borehole positioning parameters for the drilling rig in the coal mine roadway, according to the input parameters by the operation personnel, could automatically complete the adjustment of the borehole positioning parameters for the drilling rig. The parameter error could be controlled within the construction allowed scope of the borehole. Compared to the manual adjustment, the operation of the system would be safety and convenient and could improve the working efficiency.

Key words: mine roadway; drilling rig; advanced drilling; roadway excavation

0 引 言

随着目前巷道掘进技术的提升,对于超前钻探施工钻孔走向精度和钻探效率提出了更高的要求^[1]。另一方面,顶板高位钻孔抽采采空区瓦斯效果良好,且应用越来越广泛,顶板高位孔的大倾角钻

探施工和高钻遇率也要求更高的钻探精度^[2-4]。在煤矿坑道钻探施工中,调节好钻机开孔角度是整个施工的基础工作和先决条件。只有快速、精确地进行钻机开孔定位,才能够保证钻探施工顺利进行,保证钻孔走向精度得到有效控制,从而达到预期的钻探施工目标^[5]。钻孔的定位参数主要包括开孔

收稿日期:2017-03-02;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.07.020

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045003-002);国家自然科学基金面上基金资助项目(51275061);中煤科工集团西安研究院科技创新资助项目(2016XAYMS16)

作者简介:李晓鹏(1980—),男,黑龙江大庆人,助理研究员,博士。Tel:029-88767113, E-mail:lixiaopeng@cctegxian.com

引用格式:李晓鹏.煤矿坑道钻机开孔定位参数自动调节系统研究[J].煤炭科学技术,2017,45(7):112-117.

Li Xiaopeng. Study on automatic control system of borehole positioning parameters for mine roadway drilling rig[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 112-117.

方位角、开孔高度和开孔角度^[6]。开孔方位角为开孔时钻孔在水平面上的朝向与钻机机身正前方向之间的夹角;开孔高度为钻孔孔口到地面的垂直高度;开孔角度为钻孔在垂直面上的朝向与水平面的夹角。在进行钻探施工前,通过调节钻机变幅机构,并不断地测量3种参数,使钻机主机达到能够满足钻孔设计定位参数的姿态。

目前,煤矿坑道钻探定位参数调整依旧依靠施工人员通过手动操作钻机变幅调角装置来进行开孔定位作业。这种操作方式对施工人员的操作经验有较高的要求,对于大角度高位钻孔,操作效率和保障施工质量较低。施工人员在设备附近操作,存在安全隐患。目前煤矿设备利用自动化、智能化手段提高设备工作效率和工作质量,保证操作人员的安全已经成为了一种主流意识^[7-8]。笔者基于智能控制技术和电液比例控制技术,研制了矿用钻机开孔定位参数自动调节系统,该系统基于对钻机变幅装置运动学模型的解算,利用基于运动学模型的控制方法,将钻机开孔参数调节到设计目标。避免了人员操作经验的不足而造成的开孔参数误差大和操作效率低的弊端,提高了矿用钻机的自动化程度和施工效率。

1 影响开孔定位精度的因素

钻机在巷道内进行钻探施工的一种典型工作位置如图1所示,钻机的开孔方位角主要由钻机主机的朝向决定;而开孔高度和角度是由钻机主机高度和倾角决定。

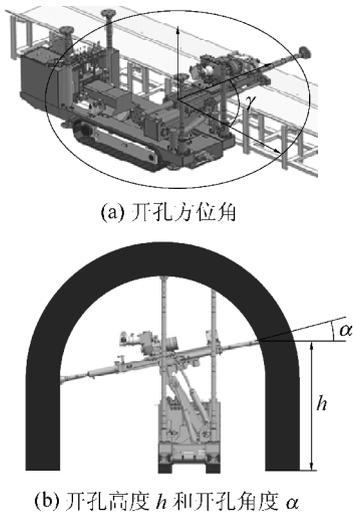


图1 钻机开孔定位参数示意

Fig. 1 Location parameters of borehole openings

开孔参数由钻机变幅机构进行控制,由于钻机变幅机构的结构特点,开孔高度和开孔角度之间具有耦合关系,给开孔定位带来了一定的困难,是造成人工调节误差较大的主要原因。因此,笔者从调角变幅机构的运动学模型入手,在分析模型的基础上,得出定位参数的制动调节方法。

2 主机姿态运动学模型

2.1 主机姿态的正解模型

为了提高钻机在煤矿巷道中的调角变幅能力,设计了如图2所示的变幅机构。这种机构具有优异的倾角调节能力和高度调节能力^[9]。钻机主机姿态运动学模型实际上是该变幅机构的运动学模型。

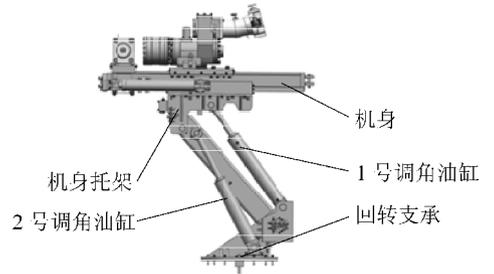


图2 钻机变幅机构

Fig. 2 Luffing mechanism for drilling rig

利用旋量运动学对变幅机构进行运动学建模。如图3所示,建立坐标系系统,固定坐标系 G_0 的原点为变幅机构回转支承中心轴在水平地面的投影,工具坐标系 G_i 的原点为钻孔中心轴线在机身正前方1 m的垂面上的投影,即钻孔开孔位置。

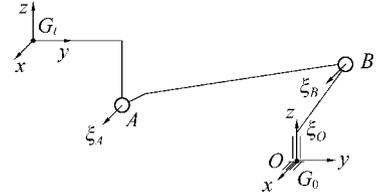


图3 钻机主机运动机构原理

Fig. 3 Moving mechanism principle of drilling rig

钻机主机运动机构具有3个运动关节,因此运动模型的坐标系系统具有3个运动旋量。初始位姿矩阵为

$$G_{i0} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \begin{pmatrix} 0 \\ y_{i0} \\ z_{i0} \end{pmatrix} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: \mathbf{I} 为三维单位矩阵; y_{i0} 、 z_{i0} 为 G_i 坐标系原点初始坐标。建立各关节运动旋量:注意到 O 点关

节围绕坐标系 Z 轴方向旋转, A 点和 B 点关节是围绕固定坐标系 X 轴方向旋转, 故其转动向量分别为

$$\boldsymbol{\omega}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\omega}_A = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\omega}_B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

其初始位置向量分别为

$$\boldsymbol{q}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{q}_A = \begin{bmatrix} 0 \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix}, \boldsymbol{q}_B = \begin{bmatrix} 0 \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix}$$

其中: y_0 、 z_0 、 y_A 、 z_A 、 y_B 、 z_B 分别为 3 个关节点的初始坐标。由此各关节的运动旋量为

$$\boldsymbol{\xi}_i = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\omega}_i \boldsymbol{q}_i \\ \boldsymbol{\omega}_i \end{bmatrix} \quad (i = O, A, B) \quad (2)$$

3 个关节的关节变量分别是 θ_0 、 θ_A 与 θ_B 。根

$$\boldsymbol{P}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} -S_0[y_{10} C_{B-A} - z_{10} S_{B-A} + z_B S_{B-A} - y_B C_{B-A} + C_B(y_B - y_A) - S_B(z_B + z_A) + y_A] \\ -C_0[y_{10} C_{B-A} - z_{10} S_{B-A} + z_B S_{B-A} - y_B C_{B-A} + C_B(y_B - y_A) - S_B(z_B + z_A) + y_A] \\ y_{10} S_{B-A} + z_{10} C_{B-A} - z_B C_{B-A} - y_B S_{B-A} + S_B(y_A - y_B) + C_B(z_B - z_A) + z_A \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: S_0 、 C_0 、 S_{B-A} 、 C_{B-A} 分别为 $\sin \theta_0$ 、 $\cos \theta_0$ 、 $\sin(\theta_B - \theta_A)$ 、 $\cos(\theta_B - \theta_A)$ 。

2.2 主机姿态的逆解模型

主机姿态运动学逆解的物理意义是已知开孔高度、角度和方位, 求出各个关节变量的数值解。变幅机构的末端位姿矩阵 \boldsymbol{G}'_i 由 4 个三维向量构成, 分别为向量 \boldsymbol{n} 、 \boldsymbol{o} 、 \boldsymbol{a} 、 \boldsymbol{p} , 其中: \boldsymbol{n} 、 \boldsymbol{o} 、 \boldsymbol{a} 三个向量表示末端姿态, \boldsymbol{p} 表示末端位置, \boldsymbol{G}'_i 的每个元素与运动学正解矩阵 \boldsymbol{G}_i 同位置元素相对应, 即:

$$\boldsymbol{G}'_i = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由变幅机构的几何结构可以得出如下角度关系:

$$\theta_B - \theta_A = \alpha - \Delta\theta \quad (7)$$

其中, $\Delta\theta$ 为钻机变幅装置与机身的夹角, 是固定参数。基于这种几何关系, 并观察正解姿态矩阵 $\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\theta})$, 如已知开孔角度 α 和方位角 γ 后, 就可以求出 \boldsymbol{G}'_i 中的 \boldsymbol{n} 、 \boldsymbol{o} 、 \boldsymbol{a} 三个末端姿态向量。如已知开孔高度, 则可以求出 \boldsymbol{p} 向量中的 p_z 分量。令 n_x 等于 $\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\theta})$ 中的第一行第一列元素, 可求出 θ_0 ; 令 p_z 等于 $\boldsymbol{P}(\boldsymbol{\theta})$ 中的第三列元素, 可以求出 θ_B ; 根据角度关系式, 可以求出 θ_A , 具体计算公式如下:

据指数积公式^[10-11], 变幅机构的正解矩阵为

$$\boldsymbol{G}_i = e^{\xi_0 \hat{\theta}_0} e^{\xi_A \hat{\theta}_A} e^{\xi_B \hat{\theta}_B} \boldsymbol{G}_{i0} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}(\boldsymbol{\theta}) & \boldsymbol{P}(\boldsymbol{\theta}) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: $\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\theta})$ 为正解矩阵的姿态矩阵, 为 3 阶方阵, 表示主机的姿态; $\boldsymbol{P}(\boldsymbol{\theta})$ 为正解矩阵的位置向量, 为 3 维向量, 表示钻孔的位置。正解矩阵的姿态矩阵为

$$\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} S_0 & -S_0 C_{B-A} & S_0 S_{B-A} \\ S_0 & C_0 C_{B-A} & -C_0 S_{B-A} \\ 0 & S_{B-A} & C_{B-A} \end{bmatrix} \quad (4)$$

正解矩阵的位置向量为

$$\begin{cases} \theta_0 = \arccos n_x \\ \theta_B = \arcsin \frac{Q}{\sqrt{M^2 + N^2}} - \arctan \frac{M}{N} \\ \theta_A = \arcsin(o_z - \theta_B) \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{cases} M = z_B - z_A \\ N = y_B - y_A \\ Q = p_z - z_A - y_B o_z - y_{st} o_z - z_{st} a_z + z_B a_z \end{cases}$$

3 开孔参数调节原理

3.1 方位角调节

从变幅机构的运动学模型中可以看出, 钻机的开孔方位角 γ 是由变幅机构第一关节变量 θ_0 直接决定的, θ_0 就可直接视为 γ 。因此在进行方位角调整时, 只需将 θ_0 调整到期望值 $\bar{\gamma}$ 即可。

3.2 开孔高度和角度调节

由于变幅机构的结构特点, 开孔高度和开孔角度之间相互耦合, 2 个参数应同时进行调整。对与设定的期望开孔高度 \bar{h} , 对应于逆解矩阵 \boldsymbol{G}'_i 中的 p_z , 即:

$$\bar{h} = p_z \quad (9)$$

对于设定的期望开孔倾角 $\bar{\alpha}$, 从变幅机构的机构参数中可以分析出:

$$\bar{\alpha} = \theta_B - \theta_A + \Delta\theta \quad (10)$$

其中, $\Delta\theta$ 为钻机变幅装置与机身的夹角, 是固

定参数。

综合2个计算公式可以表明,只要给出 \bar{h} 和 $\bar{\alpha}$,就可以利用逆解算法求取变幅机构的2个关节变量 θ_B 和 θ_A ,从而控制变幅机构的达到期望的开孔参数。进一步利用几何关系可以计算出变幅机构2个油缸的期望伸长量 \bar{u}_B 和 \bar{u}_A 。

$$\begin{cases} \bar{u}_A = \sqrt{l_{AB}^2 + l_{AD}^2 - 2l_{AB}l_{AD}\cos\theta_A} - l_{BD} \\ \bar{u}_B = \sqrt{l_{FB}^2 + l_{BC}^2 - 2l_{FB}l_{BC}\cos\theta_B} - l_{FC} \end{cases} \quad (11)$$

其中, l 为长度。

3.3 开孔参数的误差校验

在变幅控制过程中,机身的开孔参数需达到控制目标,因此需对控制效果进行校验,如果出现较大偏差则需对控制参数进行修正。分别对3个参数设置误差阈值 $|e_\gamma|$ 、 $|e_h|$ 和 $|e_\alpha|$,并由传感器检验各个参数与期望值的误差 e_γ 、 e_h 和 e_α ,当误差值大于等于阈值,则进行修正。误差的修正是利用检测误差修正控制期望值,并重新计算期望控制值:

$$\begin{cases} \bar{\gamma}' = \bar{\gamma} + e_\gamma \\ \bar{h}' = \bar{h} + e_h \\ \bar{\alpha}' = \bar{\alpha} + e_\alpha \end{cases} \quad (12)$$

修正期望值后,则重新代入逆解模型中进行计算,从而计算出新的油缸期望控制值 \bar{u}_A' 和 \bar{u}_B' 。

4 控制系统设计

4.1 硬件系统设计

根据系统控制的需求,可以设计出如图4所示的钻机开孔定位参数自动调节系统硬件结构。

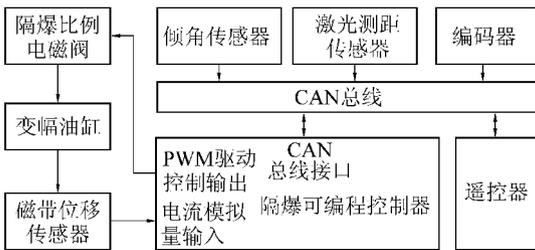


图4 钻机开孔定位参数自动调节系统硬件结构

Fig.4 Hardware structure of automatic adjustment system for hole positioning parameters of drilling rig

硬件系统以防爆可编程控制器为控制核心,负责计算控制参数和处理状态信息。防爆比例电磁阀负责驱动变幅油缸,接收控制器的PWM信号驱动比例电磁铁动作。磁致位移传感器为油缸伸缩位置

检测单元,通过控制器的电流模拟量输入端口将油缸动作信息反馈给控制器,从而构成控制闭环。倾角传感器、测距传感器和编码器分别测量钻机倾角、开孔高度和钻机方位角(钻机机身与车体平台的相对角度),用于检测控制位姿误差,校验控制效果。遥控器用于操作整个系统并输入姿态信息。由于几种传感器和遥控器在钻机的安装位置比较分散,因此采用CAN总线将其与控制器连接,并进行双向数据通信,采用CAN2.0B通信协议^[12-14]。

将PID控制器与运动模型相结合,当控制误差较小时直接利用运动模型计算出控制信号,当控制误差较大时利用PID控制修正误差^[15],提高控制精度,二者按照误差值的大小进行切换,控制原理如图5所示。

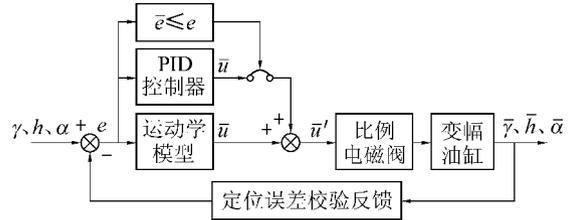


图5 PID控制原理

Fig.5 PID control principle schematic

4.2 软件流程设计

根据钻机操作规程和后台计算过程,设计钻机开孔定位参数自动调节系统软件流程如图6所示。

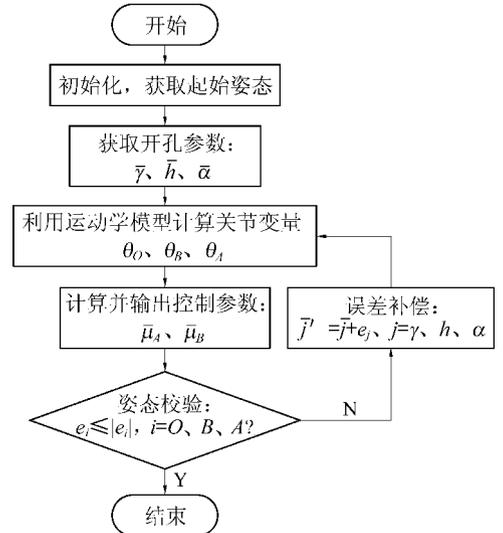


图6 钻机开孔定位参数自动调节系统软件流程

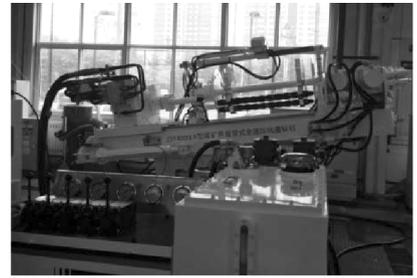
Fig.6 Software flow of automatic adjustment system for hole positioning parameters of drilling rig

5 试验

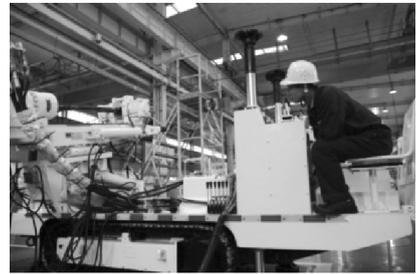
在完成煤矿坑道钻机开孔定位参数自动调节系统的设计与开发工作后,安装在ZDY4000LR型钻机

上,在车间环境中进行了对比试验验证,如图7所示。在试验中,利用本系统进行了5组不同参数的变幅试验,同时利用手动调节方式进行了相同参数的变幅运动作为对比,测量操作时间和实际误差,试验结果见表1。

从表1可知,在5组试验中利用本系统进行开孔参数调节所用时间相对于手动调节时间要少得多,调节效率很高,操作人员只需遥控输入参数后,系统自动执行动作;手动调节时操作人员需要在设备周围不断观察并测量各种参数,效率很低,具有安全隐患。2种调节方式的方位角误差相差不大,主要原因是方位角人工测量比较方便,因而手动调节也可以达到较好的精度水平。但高度误差和倾角误差等人工测量不便的参数上人工操作误差较大,最大超过10%,并且精度水平不稳定;而利用本系统调节时误差较小,各项参数调节精度水平基本保持在1.6%以下。



(a) 自动调节试验



(b) 人工调节试验

图7 对比试验

Fig. 7 Contrast experiments

表1 5组不同参数的变幅试验数据

Table 1 Comparison of amplitude test data for five groups of different parameters

| 项目 | 试验参数 | 操作方式 | 操作时间/s | 方位角误差/(°) | 高度误差/mm | 倾角误差/(°) |
|-----|---|------|--------|-----------|---------|----------|
| 试验1 | $\gamma = 0^\circ, h = 1.5 \text{ m},$ $\alpha = 30^\circ$ | 手动 | 117 | 0.5 | 15 | 0.5 |
| | | 自动 | 15 | 0.5 | 4 | 0.4 |
| 试验2 | $\gamma = 30^\circ, h = 1.9 \text{ m},$ $\alpha = 15^\circ$ | 手动 | 376 | 0.1 | 9 | 2.5 |
| | | 自动 | 27 | 0.6 | 3 | 0.1 |
| 试验3 | $\gamma = 90^\circ, h = 1.9 \text{ m},$ $\alpha = -15^\circ$ | 手动 | 461 | 0.4 | 21 | 3.1 |
| | | 自动 | 31 | 1.0 | 4 | 0.2 |
| 试验4 | $\gamma = 90^\circ, h = 1.5 \text{ m},$ $\alpha = 90^\circ$ | 手动 | 785 | 0.8 | 5 | 1.0 |
| | | 自动 | 41 | 1.0 | 1 | 0.4 |
| 试验5 | $\gamma = 90^\circ, h = 2.6 \text{ m},$ $\alpha = 10^\circ$ | 手动 | 671 | 1.0 | 30 | 1.6 |
| | | 自动 | 32 | 1.1 | 3 | 0.1 |

煤矿坑道钻机开孔定位参数自动调节系统在完成车间试验后,进行了地面实钻试验。在试验初期发现,利用本系统进行变幅操作时,偶尔出现初次变幅误差较大,需要进行误差修正。经过分析发现钻机在煤矿巷道中稳固不牢靠或稳固过程中造成轻微移位,从而导致将移位前的理论期望值运用到实际控制中产生偏差,需要在进行完初步控制后对控制效果进行校验,并作出修正控制。因此,在使用本系统时需要确保钻机稳固牢靠,并初步调平车体后可以保持较高定位精度,提高准备工作效率。

6 结 语

利用电液控制技术和智能控制技术研制了煤矿坑道钻机开孔定位参数自动调节系统,试验证明该系统相对于人工操作具有较高的控制精度和操作效率,为精确钻探、高效钻探奠定了基础。利用该系统可以确保操作人员远离设备,从而消除了安全隐患。该系统是智能化钻机技术和参数化钻进施工技术的一部分,为智能化远程控制钻机的发展做出了有益探索。

参考文献(References):

- [1] 孙荣军,李泉新,方俊,等.采空区瓦斯抽采高位钻孔施工技术及其发展趋势[J].煤炭科学技术,2017,45(1):94-99,213.
Sun Rongjun, Li Quanxin, Fang Jun, *et al.* Construction technology and development tendency of high level borehole for gas drainage in goaf [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 94-99, 213.
- [2] 潘立友,黄寿卿,陈理强,等.近距离煤层群高瓦斯工作面瓦斯立体抽放模型的建立和应用[J].煤炭学报,2012,37(9):1461-1465.
Pan Liyou, Huang Shouqing, Chen Liqiang, *et al.* Establishment and application of the stereo drainage model for high gas working face of short distance seam group [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1461-1465.
- [3] 汪芸.煤矿井下定向探放水钻机研制特点探讨[J].煤炭工程,2015,47(3):129-131.
Wang Yun. Discussion of characteristics for directional draw-off drilling rig in coal mining [J]. Coal Engineering, 2015, 47(3): 129-131.
- [4] 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.
- [5] 田炎鑫,吴银成,曾伟,等.基于超声波原理的开孔参数标定系统研究[J].工矿自动化,2014,40(3):86-89.
Tian Yanxin, Wu Yincheng, Zeng Wei, *et al.* Study of calibration system of borehole opening parameters based on ultrasonic principle [J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(3): 86-89.
- [6] 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 1800 m horizontal directional drilling technology and equipment [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 109-113.
- [7] 黄曾华.综采工作面自动化控制技术的应用现状与发展趋势[J].工矿自动化,2013,39(10):17-21.
Huang Zenghua. Application status and development tendency of automation control technology for fully mechanized working face [J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(10): 17-21.
- [8] 张小峰.高效快速掘进系统自动控制技术研究[J].煤炭技术,2016,35(11):292-294.
Zhang Xiaofeng. Research of automatic control technology of high efficient and speed road-heading system [J]. Coal Technology, 2016, 35(11): 292-294.
- [9] 宋海涛,刘亦洋,姚亚峰,等.大角度多层孔履带式全液压坑道钻机的研制与应用[J].煤炭工程,2014,46(12):126-128.
Song Haitao, Liu Yiyang, Yao Yafeng, *et al.* Development and application of the track-mounted hydraulic tunnel drilling rig for wide-angle and multi-layer holes [J]. Coal Engineering, 2014, 46(12): 126-128.
- [10] Richard M Murray, Li Zexiang, Shankar Sastry S. A mathematical introduction to robotic manipulation [M]. Florida: CRC Press, 1994.
- [11] Rocha C P, Tonetto A Dias. A comparison between the denavit-hartenberg and the screw-based methods used in kinematic modeling of robot manipulators [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2011, 27(4): 723-728.
- [12] 罗明华,沈明,薛彦波.井下瓦斯抽采钻机远程控制系统的的设计[J].工矿自动化,2011,37(8):14-16.
Luo Minghua, Shen Ming, Xue Yanbo. Design of remote control system of drill of gas extraction in coal mine underground [J]. Industry and Mine Automation, 2011, 37(8): 14-16.
- [13] 单成伟.基于CAN总线的钻参仪设计[J].工矿自动化,2014,40(3):25-27.
Shan Chengwei. Design of drilling parameter monitor based on CAN bus [J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(3): 25-27.
- [14] Karasakal O, Yesil E, Guzelkaya M, *et al.* Implementation of a new self-tuning fuzzy PID controller on PLC [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2005, 13(2): 277-286.
- [15] 李潘伟.基于PLC的积分分离PID控制系统在精密校直液压机中的应用[J].机床与液压,2015,43(14):152-154.
Li Panwei. Application of PLC based integral separation PID control system in precision straightening hydraulic press [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(14): 152-154.
- Chen Yilin, Qin Yong, Tian Hua, *et al.* Particle size effect of pore structure of anthracite by mercury porosimetry [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(9): 1629-1639.
- [20] 陈振宏,贾承造,宋岩,等.高煤阶与低煤阶煤层气藏物性差异及其成因[J].石油学报,2008,29(2):179-184.
Chen Zhenhong, Jia Chengzao, Song Yan, *et al.* Differences and origin of physical properties of low-rank and high-rank coal-bed methanes [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 179-184.

(上接第155页)

New York: WH Freeman, 1983.

- [17] Rootare H M, Prenzlow C F. Surface areas from mercury porosimetry measurements [J]. Journal of Physical Chemistry, 1967, 71(8): 2733-2736.
- [18] 霍多特 B B. 煤与瓦斯突出 [M]. 宋士钊, 王佑安, 译. 北京: 中国工业出版社, 1966.
- [19] 陈义林, 秦勇, 田华, 等. 基于压汞法无烟煤孔隙结构的粒度效应 [J]. 天然气地球科学, 2015, 26(9): 1629-1639.