

矿井避难硐室自动控制系统研究

席 健 张英华 黄志安 高玉坤
(北京科技大学 土木环境工程学院 北京 100083)

摘 要: 针对矿井避难硐室应急响应流程复杂、操作难度大、管理培训困难等问题,通过数学建模、仿真模拟、硬件编程等方式,对避难硐室自动控制系统进行研究,提出了自动控制系统的组成方式及基于该控制系统的避难硐室应急响应流程。实现了对避难硐室电力系统和压风系统的自动状态检测及切换,得出了100人避险条件下的压风切换阈值为0.48 MPa。实现了压风量、温度、O₂浓度、CO₂浓度等参数的自动调节,并通过Simulink软件仿真模拟得出:该控制系统在100人避险条件下,O₂、CO₂、温度超限恢复响应时间分别为11.7、15.0、13.3 min。同时利用人机界面,对整个硐室进行直观、有效地控制。运用该系统,可以有效提升矿井避难硐室应急响应效率,降低操作、管理及培训难度。

关键词: 避难硐室; 自动控制; PLC技术; PID控制; 系统仿真

中图分类号: TD77; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)03-0112-05

Study on automatic control system of mine refuge chamber

Xi Jian, Zhang Yinghua, Huang Zhian, Gao Yukun

(School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the complicated emergency response procedure, high difficult operation, difficult management and training and other problems of the mine refuge chamber, the mathematic modeling, analogue simulation, hardware programming and other method were applied to the study on the automatic control system of the mine refuge chamber. The composition mode of the automatic control system and the emergency response procedure of the refuge chamber were provided. The automatic status detection and switching of the refuge chamber electric power system and compressed air system were realized and the compressed air switching threshold value was 0.48 MPa under the condition of 100 persons in the refuge chamber. The automatic adjustment of the compressed air volume, temperature, oxygen concentration, carbon dioxide concentration and other parameters were realized. The Simulink similar simulation showed that under the condition of 100 persons in the refuge chamber, the temperature overlimit response time of the control system was 11.7, 15.0 and 13.3 min individually. A man-machine interface was applied to the direct and effective control of the whole chamber. With the application of the system, the emergency response efficiency of the mine refuge chamber could be effectively improved and the difficulty of the operation, management and training could be reduced.

Key words: refuge chamber; automatic control; PLC technology; PID control; system simulation

0 引 言

紧急避险系统作为煤矿井下安全避险“六大系统”之一,因其发展时间短,建设周期长,系统复杂度高,智能化、信息化程度相对较低,导致其普遍存在操作使用难度大、培训管理复杂、需要专人

值守等问题^[1-3]。避难硐室作为紧急避险系统的核心组成,也是矿井应急响应流程中的重要环节。其控制系统的自动化程度直接制约着整个紧急避险系统的智能化和信息化,直接影响着矿井应急响应的效率。目前,避难硐室内部控制,主要依靠人工完成,避险人员需要根据遇险人数、传感器读数等各类

收稿日期:2015-09-10;责任编辑:赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.03.022

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474017)

作者简介:席 健(1989—)男,山西洪洞人,博士研究生。Tel:010-62349725, E-mail: jianxichn@gmail.com

引用格式:席 健,张英华,黄志安,等.矿井避难硐室自动控制系统研究[J].煤炭科学技术,2016,44(3):112-116,134.

Xi Jian, Zhang Yinghua, Huang Zhian, et al. Study on automatic control system of mine refuge chamber[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 112-116, 134.

信息,手动调节压风、供氧、气动风机、液态 CO_2 制冷等装置,这对人员的素质、培训提出了很高的要求。当灾害发生时,人工控制还可能造成一定程度的延迟,使得避难硐室无法在第一时间正常工作。硐室运行过程中,人工调节容易使避难硐室内部各项环境参数出现波动,并且当环境参数超限或突变时,也无法及时恢复。此外,人工调节通常存在过度控制的问题,造成硐室内部资源的浪费,影响避险时间。利用 PLC 控制系统,可以稳定、高效地对硐室进行控制,还可以利用人机交互界面,最大程度地简化控制过程^[4-5],降低人员的操作难度和培训成本。

1 避难硐室自动控制系统工作原理

井下紧急避险设施是指在井下发生灾害事故时,为无法及时撤离的遇险人员提供生命保障的密闭空间。该设施对外能够抵御高温烟气,隔绝有毒有害气体,对内提供氧气、食物、水,去除有毒有害气体,创造生存基本条件,为应急救援创造条件、赢得时间。避难硐室自动控制系统应急响应流程如图 1 所示。

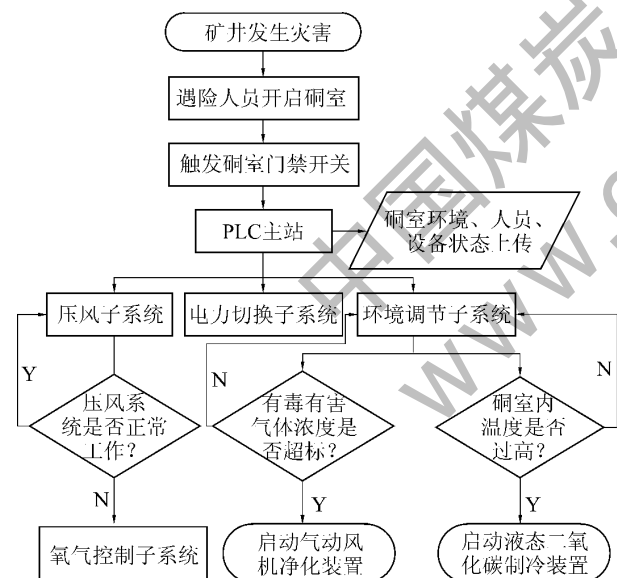


图 1 避难硐室自动控制系统应急响应流程

Fig. 1 Emergency response procedure of refuge chamber automatic control system

从图 1 可知,避难硐室自动控制系统的要点在于应急流程的自动化以及各个系统、设备之间的协调。其中以遇险人员开启硐室,触发硐室的门禁开关,视为应急流程的开始,主控系统检测到门禁打开的信号之后,发出报警信号,各个分系统开始工作,并检测个系统是否工作正常。之后进入生存保障阶

段,该阶段自动控制方式分为 2 种:一种为根据避险人员数量进行控制,例如压风量等参数,此时人员定位读卡器实时读取遇险人员数量等信息,控制系统将人员数量与国家规定的人均量相乘,再将最终控制量输出至执行机构;另一种控制方式为设定参数控制方式,即根据设定的参数,建立控制量与被控制量之间数学模型,利用 PID 方式调节控制量,使得被控制量保持在设定的参数范围内,此种控制方式用于供氧系统和环境控制系统。

2 避难硐室自动控制系统组成

避难硐室自动控制系统主要由各类传感器、主控系统、分控系统和执行机构 4 个部分组成,如图 2 所示。

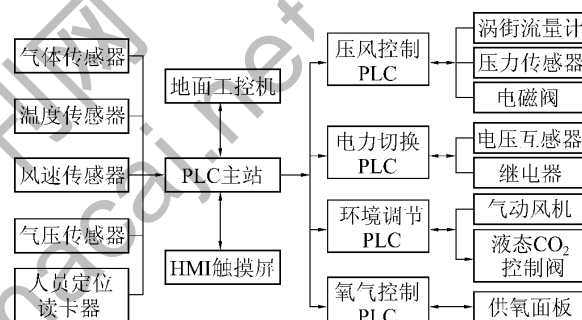


图 2 避难硐室自动控制系统组成

Fig. 2 System composition of refuge chamber automatic control system

2.1 电力切换控制

为了保证避难硐室能应对多种突发事件,硐室内供电系统设计采用多级供电方式。目前,避难硐室内动力电缆采用井下及地面钻孔双向引入的方式。双路电源的采用涉及电源切换的问题,目前避难硐室多采用手动切换或者双回路启动器^[6]方式进行切换,此种方式无法实现对供电线路的状况进行监控及远程控制,存在一定隐患。电力控制子系统采用 EM331 模拟量输入模块,采集经过处理的供电线路电压信号,经 PLC 内部程序处理判断,再通过开关量输出控制真空馈电开关(图 3),实现电力的切换控制。

2.2 压风控制

压风系统是避难硐室生存的保障核心,具有供氧、空气净化、温湿度调节的 3 项主要功能^[7-8],因此压风系统的工作状态是自动控制系统重要的监控要素之一,其组成如图 4 所示。

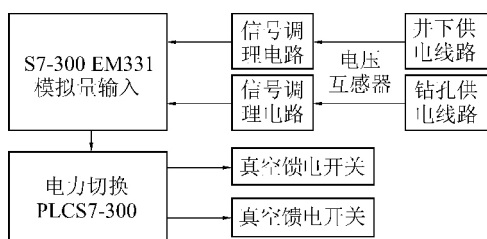


图3 电力切换子系统

Fig. 3 Electric switching subsystem

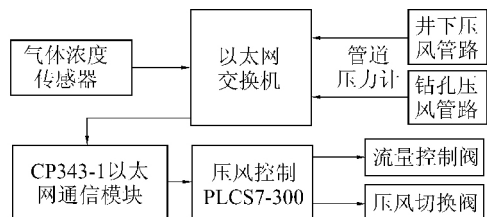


图4 压风系统状态监控

Fig. 4 Monitor and control of compressed air system

以100人的避难硐室为例,依照国家要求平均风量为 $0.3 \text{ m}^3/\text{min}$,则硐室内部总风量 Q 为 $30 \text{ m}^3/\text{min}$,通风管路直径为 100 mm ,摩擦阻力系数 λ 取 0.023 ,支管局部阻力系数 ξ 取 0.3 ,末端散流器50个,形状为正方形散流器,边长 l 为 30 cm ,取管道末端处散流器为参照点,设通风管路长度 L 为 15 m ,则节点动压 $P_d = 0.103 \text{ MPa}$;摩擦阻力 $P_m = 0.35 \text{ MPa}$;局部阻力 $P_j = 0.031 \text{ MPa}$;在该硐室内部,压风系统的切换阈值 $P_v = P_d + P_m + P_j = 0.484 \text{ MPa}$ 。2组管道压力传感器分别对井下压风系统及钻孔供气源进行监控,正常状态下优先采用井下压风系统,如出现井下压风系统下降在阈值的20%以内,则自动控制系统将发出预警;如果下降超过50%,则会根据钻孔供气源的情况,若钻孔供气正常,则切换至钻孔供气,若钻孔供气未启用,则启动备用氧气瓶系统。

2.3 供氧控制

供氧系统主要针对井下压风系统失效、钻孔保障系统尚未启动,以及无钻孔的硐室情况设计的。供氧控制数学模型如下:

$$\frac{du}{dt} = \frac{Q_u - uQ_u - nE_{O_2}}{V}$$

其中: u 为硐室内部氧气体积分数; t 为时间; Q_u 为常压下供氧量; n 为避险人员数量; E_{O_2} 为人均耗氧量; V 为硐室体积。

以100人的避难硐室为例, E_{O_2} 取 0.25 L/min , V 取 300 m^3 ,设定氧气体积分数为21%,利用Simulink

软件^[10],PID方法整定参数^[11-13],得出此状态下氧气体积分数变化规律如图5所示。图5a显示出建立氧气体积分数平衡的过程,图5b模拟了500 s时刻耗氧量增加,氧气体积分数下降至18%以下时,控制系统经过调节供氧量 Q_u ,在11.7 min时间内,使得氧气浓度恢复正常。

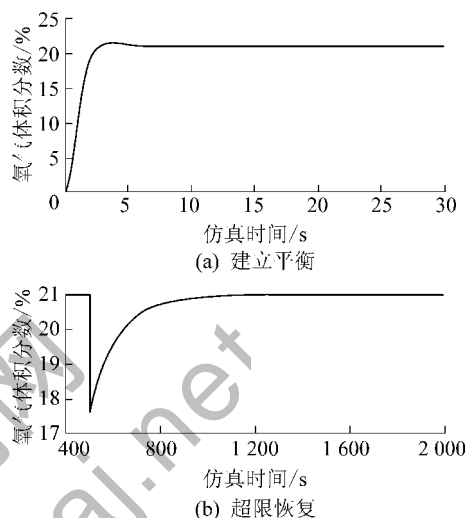


图5 氧气体积分数Simulink仿真曲线

Fig. 5 Simulink simulation curve of O_2 concentration

2.4 环境调节控制

环境控制主要针对有害气体去除及温度控制,其核心在于通过控制气动马达和液态 CO_2 制冷装置的工作状态,实现不同避险环境下的空气净化和温度控制,环境调节控制子系统工作原理如图6所示。

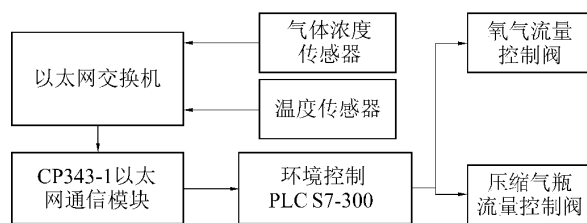


图6 环境调节控制子系统工作原理

Fig. 6 Environment control subsystem working principles

去除 CO_2 数学模型如下:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{nE_{CO_2} - aQ_v}{V}$$

其中: v 为硐室内部 CO_2 体积分数; E_{CO_2} 为人均 CO_2 释放量; Q_v 为空气净化器出风量; a 为净化剂 CO_2 吸附率。以100人的避难硐室为例, E_{CO_2} 取 0.33 L/min ^[9], V 取 300 m^3 , a 取 0.018 (平均每立方米吸收 CO_2 量),设定 CO_2 体积分数为 0.03% ,利用Simulink软件,PID方法整定参数,得出此状态下 CO_2 体

积分数变化规律,如图 7 所示。

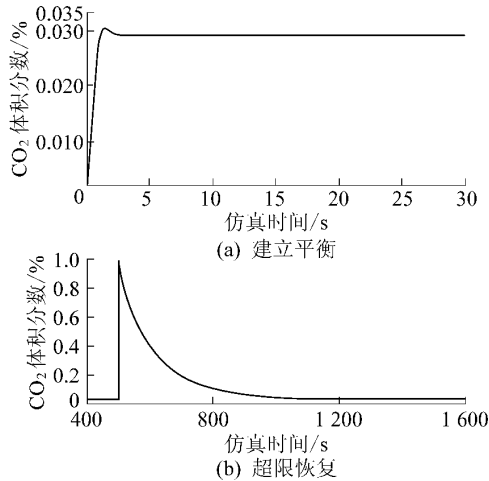


图 7 CO₂ 体积分数 Simulink 仿真

Fig. 7 Simulink simulation of CO₂ concentration

图 7a 显示出建立 CO₂ 浓度平衡的过程,图 7b 模拟了 500 s 时刻,CO₂ 呼出量增加,CO₂ 体积分数上升至 1% 以上时,控制系统经过调节气动风机风量 Q_v ,在 15 min 时间内,使得 CO₂ 浓度恢复正常。液态 CO₂ 温度控制模型如下^[14-15]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{nH_m + mH_r - Q_w H_{CO_2}}{cpV}$$

其中: H_m 为人体产热量; m 为围岩面积; H_r 为围岩散热量; Q_w 为常压下 CO₂ 排出量; H_{CO_2} 为 CO₂ 吸收热量; c 为空气比热容; ρ 为空气密度。

以 100 人的避难硐室为例, H_m 取 120 W, H_r 取 20 W, m 取 400 m², H_{CO_2} 取 1 200 W, V 取 300 m³, 空气比热容、密度取标准状况下数值,设定温度为 25 ℃,利用 Simulink 软件, PID 方法整定参数,得出此状态下温度变化规律,如图 8 所示。图 8a 显示出建

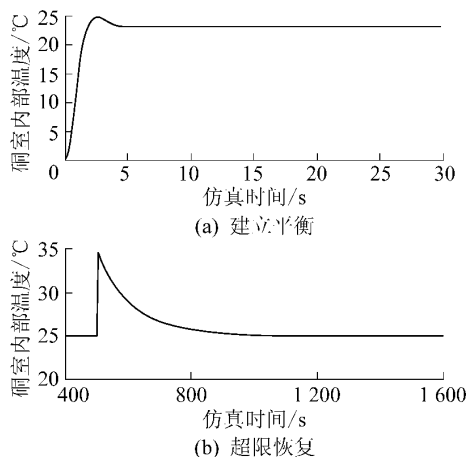


图 8 温度 Simulink 仿真

Fig. 8 Simulink simulation of temperature

立温度平衡的过程,图 8b 模拟了 500 s 时刻,温度上升至 35 ℃ 时,控制系统经过调节液态 CO₂ 排出量 Q_w ,在 13.3 min 时间内,使得温度恢复到设定值。

3 避难硐室自动控制系统的实现

3.1 系统硬件组成

避难硐室内部传感器负责采集气体浓度、风速、气压、温湿度、防爆密闭门开闭、人员进入数量等状态,传感器数据通过 Modbus 协议方式^[16-17]或者模拟量输入方式,将传感器采集的数据集中到 PLC 主站。HMI 操作屏内核为西门子 TP277,与 PLC 主站连接,负责显示各个系统的工作状态及硐室各项环境参数,默认情况下系统按照设定参数自动运行,特殊情况下避险人员可利用该界面手动切换压风、电力系统,设定需要的 O₂、CO₂、温度等参数。

PLC 主站内核为 S7-300 系列, SM321 数字量输入模块上 I0.0 接口用于采集门禁开关量。CP341 模块上的 RS-422/485 接口采用 Modbus 协议及多站点轮询方式,与各个传感器通信并采集信号,对于不支持 Modbus 协议的传感器,利用 SM331 模拟量输入接口进行采集, DP 接口用于连接 HMI 操作屏。CP343-1 模块上的 RJ45 接口,用于连接以太网交换机,实现 PLC 主站与各分系统 PLC 之间的通信^[18-19],主站与分系统之间采用通用 TCP/IP 通信协议。

对于电力切换 PLC, SM331 模块采集电压互感器的信号, SM322 数字量输出模块 Q0.0 和 Q0.1 对供电线路进行控制;对于压风切换 PLC, SM323 数字量输入/输出模块上的 I0.0、I0.1 采集阀门开/关到位信号, Q0.0、Q0.1 控制阀门开闭;对于环境控制 PLC, SM331 模拟量输入模块采集阀门开度信号, SM322 数字量输出模块上 Q0.0、Q0.1、Q1.0、Q1.1 控制阀门开闭;对于氧气控制 PLC,采用 SM331 模拟量输入模块采集阀门开度信号,采用 SM322 数字量输出模块上的 Q0.0、Q0.1 控制阀门开闭。

3.2 系统软件编程方式

采用 TIAPortalV13 开发平台, PLC 主站主要负责传感器数据的采集,利用 FB8、FB7 功能模块以轮询的方式,读取各个传感器的地址空间, FC5、FC6 功能模块负责以太网数据传输。PLC 分站利用

FB41 功能模块进行 PID 调节控制^[20], 系统运行时的扫描周期为 8 ms。

4 结 论

1) 结合自动控制系统及相应的应急响应流程, 可以提升避难硐室应急响应速度, 提高避难硐室运行的稳定性及可靠性, 门禁报警机制也减少了日常避难硐室值守成本。

2) 实现了避难硐室电力系统和压风系统的状态可靠监控以及在应急状态下的自动切换。

3) 确定了 100 人避险条件下, 压风系统切换阈值为 0.48 MPa。

4) 控制系统可根据设定值, 实现环境参数的自动调节, 在 100 人避险条件下, O_2 、 CO_2 、温度超限恢复响应时间分别为 11.7、15.0、13.3 min。

5) 利用人机界面, 对整个硐室进行直观、有效地控制, 降低了避险人员操作难度及培训成本。

参考文献(References):

- [1] 孙继平. 煤矿井下避难硐室与救生舱关键技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 713-717.
Sun Jiping. The key technologies of the refuge chamber and rescue capsule in the underground coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5): 713-717.
- [2] 韩海荣, 金龙哲, 高娜, 等. 常村矿避难硐室地面钻孔生命保障系统研究[J]. 金属矿山, 2011(5): 149-153.
Han Hairong, Jin Longzhe, Gao Na, et al. Life support system of ground boreholes in refuge station of Changcun Mine [J]. Metal Mine, 2011(5): 149-153.
- [3] 高娜, 金龙哲, 王磊, 等. 常村煤矿避难硐室供氧系统研究与应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 1021-1025.
Gao Na, Jin Longzhe, Wang Lei, et al. Research and application of oxygen supply system in changcun coal mine refuge haven [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 1021-1025.
- [4] 周如禄. 矿井水净化处理自动化监控系统开发与应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(S1): 202-206.
Zhou Rulu. Development and application of the automatic monitoring system for purification treatment of mine water [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S1): 202-206.
- [5] 柴瑞娟, 陈海霞. 西门子 PLC 编程技术及工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 38-50.
- [6] 尤飞, 金龙哲, 高娜, 等. 乌兰煤矿永久避难硐室供电系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(11): 80-82.
You Fei, Jin Longzhe, Gao Na, et al. Study on power supply system of permanent refuge chamber in Wulan Mine [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(11): 80-82.
- [7] 金龙哲, 赵岩, 高娜, 等. 矿井避难硐室供氧系统研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(11): 21-26.
Jin Longzhe, Zhao Yan, Gao Na, et al. Study on oxygen supply system of mine refuge haven [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(11): 21-26.
- [8] 尤飞, 金龙哲, 韩海荣, 等. 避难硐室压风供氧系统压风量研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(7): 116-120.
You Fei, Jin Longzhe, Han Hairong, et al. Research on air supply to refuge chamber [J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(7): 116-120.
- [9] 栗婧, 金龙哲, 汪声, 等. 矿井密闭空间中人体呼吸熵计算[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(8): 963-967.
Li Jing, Jin Longzhe, Wang Sheng, et al. Respiratory quotient calculation of the human body at a confined space in coal mines [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(8): 963-967.
- [10] 陈焕新, 杨培志, 张登春. 列车车厢中 CO_2 浓度控制系统的仿真[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2002, 17(3): 75-77.
Chen Huanxin, Yang Peizhi, Zhang Dengchun. Emulation about the control system of CO_2 concentration in train compartment [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2002, 17(3): 75-77.
- [11] 何芝强. PID 控制器参数整定方法及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 25-28.
- [12] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 40-45.
- [13] 姜海涛. 基于软 PLC 的 PID 控制系统的设计与实现[D]. 沈阳: 中国科学院研究生院, 2012: 30-33.
- [14] 詹子娜, 金龙哲, 王奕, 等. 井下避难硐室温湿度分布及耦合机理研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2014, 35(11): 1636-1640.
Zhan Zina, Jin Longzhe, Wang Yi, et al. Distribution and coupling mechanism of temperature and relative humidity in underground mine refuge chamber [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2014, 35(11): 1636-1640.
- [15] 高玉坤, 王晶晶, 仝鑫隆, 等. 煤矿井下避难硐室温度变化规律研究[C]//2012(沈阳) 国际安全科学与技术学术研讨会. 沈阳: 东北大学, 2012: 167-171.
- [16] 徐鹏鹏. 基于 S7-300/200 PLC 和 Modbus 协议的电力参数采集系统[J]. 工矿自动化, 2011(12): 104-107.
Xu Pengpeng. Electrical parameter acquisition system based on S7-300/200 PLC and modbus protocol [J]. Industry and Mine Automation, 2011(12): 104-107.
- [17] 王彦齐. 西门子 S7-300 PLC 的 Modbus-RTU 通信实现[J]. 煤矿机械, 2014, 35(5): 205-206.
Wang Yanqi. Realization of siemens S7-300 PLC Modbus-RTU communication [J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(5): 205-206.
- [18] 张震, 高娇, 侯曼曼. 基于 S7-300 PLC 的煤矿井下输送带集中控制系统[J]. 煤矿机械, 2015, 36(1): 224-225.

(下转第 134 页)

- 初探[J].煤炭科技,2012(3):27-31.
- Sun Zhifan,Yan Shijie,Wang Yongquan,et al.Primary investigation of water inrush from separation layer over mining face of soft rock stratum[J].Coal Science & Technology Magazine,2012(3):27-31.
- [9] 张永红.采场覆岩层离层积水对开采的影响及防治[J].陕西煤炭,2013(2):46-48.
- Zhang Yonghong.Influence,prevention and control of separation layer water on mining face in overlying rock[J].Shaanxi Coal,2013(2):46-48.
- [10] 江波,魏新,张玉东.海下软覆岩煤层顶板离层水发育规律数值模拟研究[J].矿业安全与环保,2013,40(2):24-27.
- Jiang Bo,Wei Xin,Zhang Yudong.Numerical simulation research on roof bed-separation water development rule of submarine coal seam with incompetent overburden rock[J].Mining Safety & Environmental Protection,2013,40(2):24-27.
- [11] 王长俊,郝延锦.关于岩层移动过程中的离层位置判别[J].煤炭技术,2008,27(5):140-141.
- Wang Changjun,Hao Yanjin.Study on separated strata mechanism in coal mine[J].Coal Technology,2008,27(5):1-2.
- [12] 杨伦,于广明,王旭春,等.煤矿覆岩采动离层位置的计算[J].煤炭学报,1997,22(5):477-480.
- Yang Lun,Yu Guangming,Wang Xuchun,et al.Calculation of position of separated strata due to mining in coal mine[J].Journal of China Coal Society,1997,22(5):477-480.
- [13] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等.岩层控制的关键层理论[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003:18-20.
- [14] 杨庆,乔伟,乐建,等.巨厚煤层综采工作面顶板离层水形成条件分析及评价[J].矿业安全与环保,2014,41(3):64-70.
- Yang Qing,Qiao Wei,Le Jian,et al.Analysis on formation condition of water in roof bed separation in fully mechanized face of extra-thick seam and evaluation of its risk[J].Mining Safety & Environmental Protection,2014,41(3):64-70.
- [15] 乔伟,黄阳,袁中帮,等.巨厚煤层综放开采顶板离层水形成机制及防治方法研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(10):2076-2084.
- Qiao Wei,Huang Yang,Yuan Zhongbang,et al.Study of formation mechanism and prevention method of water inrush from roof bed separation with full-mechanized caving mining ultra thick coal seam[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(10):2076-2084.
- (上接第116页)
- Zhang Zhen,Gao Jiao,Hou Manman.Centralized control system of coal mine underground belt based on S7-300PLC[J].Coal Mine Machinery,2015,36(1):224-225.
- [19] 张霖.基于S7-300PLC的煤层气发电生产过程监控系统的研究与设计[D].太原:太原理工大学,2010:30-33.
- Zhang Lin.The research and design of the monitoring system for coal-bed methane power generation process based on S7-300PLC[D].Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2010:30-33.
- [20] 赵桂清.基于S7-300的工业锅炉PID控制[J].制造业自动化,2011,33(5):24-26.
- Zhang Guiqing.PID control for industrial boilers based on S7-300[J].Manufacturing Automation,2011,33(5):24-26.