

基于 PLC 的煤炭地下气化过程测控系统^①

刘兆峰¹, 杜旭明¹, 王作棠², 王亚冬¹, 路峰迎¹, 李广鹏³

¹(山东建筑大学 信息与电气工程学院, 济南 250101)

²(中国矿业大学, 徐州 221008)

³(山东商业职业技术学院, 济南 250101)

通讯作者: 刘兆峰, E-mail: goldauto@163.com

摘 要: 为了实现对煤炭地下气化中各种参数的实时监控与数据分析, 准确的实现对生产过程中各个关键变量的控制, 本文设计了基于 PLC 的煤炭地下气化过程测控系统, 本文首先介绍了地下气化的工艺流程和检测需求分析, 其次对总体方案和软硬件进行设计, 最后对数据库以及应用到的数学模型进行简单的介绍, 测控系统由三层拓扑结构构成: 设备层、控制层、监控层. 设备层包括基本的硬件设备; 控制层包括两个西门子 S7-300 系列 PLC 站, 构成双 CPU 软冗余系统, 保证当其中一个 PLC 站出现故障时可保障点火巷的稳定送风; 而监控层使用组态王和 Navicat Premium 等软件, 实现了对数据实时监控显示、视频画面实时监控显示、历史数据存储等工作. 此项目已经成功在隶属于贵州盘江精煤股份有限公司的山脚树矿成功运行近一年时间.

关键词: 煤炭地下气化; PLC; 双闭环 PID 控制; 模糊 PID; 测控系统

引用格式: 刘兆峰, 杜旭明, 王作棠, 王亚冬, 路峰迎, 李广鹏. 基于 PLC 的煤炭地下气化过程测控系统. 计算机系统应用, 2018, 27(10): 106-111. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/6577.html>

UCG Measurement and Control System Based on PLC

LIU Zhao-Feng¹, DU Xu-Ming¹, WANG Zuo-Tang², WANG Ya-Dong¹, LU Feng-Ying¹, LI Guang-Peng³

¹(College of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

²(China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

³(Shandong Institute of Commerce and Technology, Jinan 250101, China)

Abstract: In order to achieve the various parameters in the process of underground coal gasification of real-time monitoring, data analysis, and the realization of accurate control of the production process of all key variables, this study designs the underground coal gasification process measurement and control system based on PLC. This paper first introduces the underground gasification process and testing requirements analysis, secondly presents the design of overall scheme and hardware and software, finally elaborates the database and mathematical model used in the applications. The mathematical model of measurement and control system consists of three layers of topology: device layer, control layer, and monitoring layer. The equipment layer includes the basic hardware devices. The control layer includes two Siemens S7-300 series PLC station, constituting the double CPU soft redundancy system, to ensure the stable air supply in ignition lane when one PLC station fails. Monitoring layer uses the configuration KingView and Navicat Premium software. Above design realizes the real-time monitoring of data display, video image real-time monitoring, historical data storage,

① 基金项目: 贵州省科技厅重大科技专项(黔科合重大专项字[2015]6011); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室资助项目(SKLCRSM10X04); 山西省科技厅资助项目(20130321026-01)

Foundation item: Science and Technology Major Project of Science and Technology Department of Guizhou Province ([2015]6011); Supporting Project of State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining (SKLCRSM10X04); Supporting Project of Science and Technology Department of Shanxi Province (20130321026-01)

收稿时间: 2018-03-02; 修改时间: 2018-03-28; 采用时间: 2018-04-02; csa 在线出版时间: 2018-09-28

and so on. This project has been successful run for nearly a year in Shanjiaoshu Mine affiliated with Guizhou Panjiang Reined Coal Co. Ltd..

Key words: UCG; PLC; double closed loop PID control; fuzzy PID; measurement and control system

引言

我国具有丰富的煤炭资源,多年以来我国经济与 社会的发展所需要的能源主要来自于煤炭资源^[1].但是,随着我国发展越来越迅速,对煤炭的直接燃烧所产生的问题逐渐暴露出来.燃烧效率低下、环境污染大等问题使对改变能源来源的需求变的刻不容缓,尤其在 国内各大城市纷纷禁止燃煤的政策下,使清洁能源的发展更加迅速^[2].但是在国内,如何将传统的煤炭资源变为清洁能源的研究较少,相较而言国外在此方面有较多的研究.煤炭地下气化(Underground Coal Gasification, UCG)将煤炭在地下燃烧并经过一系列氧化还原反应后直接输送到地面,使煤炭资源的使用更为高效、清洁,延长矿井的服务年限,提高生产安全性,具有良好的发展前景.

由于煤炭地下气化系统中需监测的点较多且分布范围广,环境较为恶劣,因此测控系统的设计尤为重要.在国内,对于煤炭地下气化测控系统的研究较少,且现有的测控系统难以适应多粉尘、强干扰、潮湿、多数据、高实时的复杂作业环境.西门子 S7-300 系列的 PLC 可靠性高、适应范围广、具有良好的通信功能、结构模块化^[3],能在各种复杂环境中稳定运行,很适合在煤炭地下气化系统中使用.与贵州盘江精煤股份有限公司山脚树矿煤层气地下气化关键技术及产业化示范研究相结合,设计了基于西门子 S7-300 系列 PLC 的煤炭地下气化实时测控系统.

1 总体方案设计

1.1 地下气化的工艺流程

煤炭地下气化的工艺流程如图 1 所示.其中,空气来自于两台由变频器控制的罗茨风机,通过注气管道经过注气孔注入地下料塔;氧气来自于制氧车间,通过注气管道经过注气孔注入地下料塔;水蒸气来自于洗煤厂,通过蒸汽管道经过蒸汽孔注入地下料塔.在地下料塔中将氧气、空气、水蒸气混合后送入点火巷,并且使用点火器点燃点火巷中的煤层,所产生的粗煤气(主要包含氢气、甲烷、氧气、一氧化碳、二氧化碳,

含有少量焦油等其他杂质)通过粗煤气管道送至地面,经过地上排气孔之后使用循环水进行冷却,冷却后的气体送入粗煤气罐.将粗煤气罐中的粗煤气进行除焦油、干燥、脱硫等操作后净化为干净的煤气,将煤气取一小部分送入煤气组分分析装置中,剩余煤气在有其他用户购买之前考虑火炬放空.

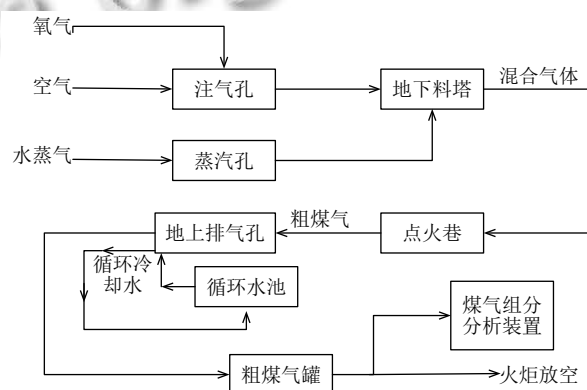


图 1 地下气化工艺流程图

1.2 监测需求分析

地下气化实时监测系统应具有过程控制(连续控制和离散控制)、操作、显示记录、报警、制表打印、信息管理、与上位机通讯、系统组态以及自诊断、WEB 发布等基本功能.在不同的工况下根据煤气的组分自动分析并提示操作人员改变送风量、注气含氧量及注蒸汽量等特殊功能.

具体包括以下参数:

(1) 模拟量输入: 51 路 K 型热电偶温度信号(4~20 mA 电流信号), 7 路 PT100 型热电阻温度信号(4~20 mA 信号), 2 路 GJC4 型矿用甲烷浓度检测仪气体浓度信号(4~20 mA 电流信号), 2 路 QT22-GTH 矿用一氧化碳浓度检测仪气体浓度信号(4~20 mA 电流信号), 3 路 GUY5 型液位传感器液位信号(4~20 mA 电流信号), 5 路 3051DP 型智能微差压变送器(4~20 mA 电流信号), 9 路标准型孔板流量计流量信号(4~20 mA 电流信号), 5 路气体分析仪气体组分信号(4~20 mA 电流信号), 2 路变频器反馈频率信号(4~20 mA 电流信号).

(2) 模拟量输出: 2路模拟量输出信号(4~20 mA 电流信号), 用于控制变频器的输出频率, 从而改变罗茨风机的转速.

(3) 数字量输入: 19路 24VDC, 用于监测点火器与气动阀门的状态.

(4) 数字量输出: 19路 24VDC, 用于控制点火器与气动阀门的开关.

(5) 上位机动态画面监视, 具有点火器控制、气动阀门控制、手动与自动控制切换、显示记录、报警、制表打印、信息管理等功能.

(6) 厂区及矿井内关键地点有视频实时监控.

1.3 总体方案与硬件设计

通过对监测需求的分析, 测控系统用三层拓扑结构构成: 设备层、控制层、监控层.

设备层包括 51 个 K 型热电偶, 测量范围为 0~1100 °C; 7 个 PT100 热电阻, 测量范围为-200~650 °C; 2 个甲烷浓度检测仪, 测量范围为 0%~4%; 2 个一氧化碳分析仪, 测量范围为 0%~4%; 3 个 GUY5 型液位传感器, 测量范围 0~5 米; 5 个压力变送器, 测量范围 0~1 MPa; 一台气体分析仪, 共输出 5 路气体组分信号, 分别为氧气浓度(0%~25%)、二氧化碳浓度(0%~50%)、氢气浓度(0%~60%)、一氧化碳浓度(0%~50%)、甲烷浓度(0%~10%); 9 个孔板流量计(带变送器), 测量范围 0~5000 m³/h; 2 台西门子 MM430 变频器(控制罗茨风机的输出功率); 18 个网络高清摄像头. 以上模拟量所用传输信号均为 4~20 mA, 均使用带屏蔽层的双绞线连接, 可以有效减少不必要的干扰, 保证信号传输准确^[4,5]. 网络高清摄像头使用工业以太网和光纤将画面实时传输至监控系统.

控制层包括两个西门子 S7-300 系列 PLC 站, CPU 均为 CPU314C-PN/DP, 一个站位于地面作为主站, 另一个站位于井下作为从站, 由于两个站距离较远故采用工业以太网和光纤进行通讯. 两个站将所采集的数据实时上传至上位机, 同时两个站可以根据所采集的数据对变频器的输出频率进行自动控制, 实现系统的自动运行. 在手动控制变频器状态下, 两个 PLC 站均可单独实现对变频器的控制, 主站通过模拟量输出信号设置变频器频率, 从站通过工业以太网和 PROFIBUS 总线实现对变频器的控制, 这样可以构成双 CPU 软冗余系统^[6], 保证当其中一个 PLC 站出现故障时可保障点火巷的稳定送风.

监控层配备两台工控机, 其中一台留作备用, 构成双机冗余系统, 实现对数据实时监控显示、视频画面实时监控显示、历史数据存储、故障诊断等工作.

1.4 双机冗余系统设计

在操作员站中, 配备两台工控机, 其中一台为默认主机, 另一台为冗余主机. 两台主机具有相同的功能和权限, 并且可以相互无关联的独立工作. 在热备冗余模式下, 两台主机之间相互监控, 各自拥有独立的数据库, PLC 主站与从站的数据同时发送到两台主机中, 两台主机各自对数据进行相应处理. 当其中一台主机出现故障时, 另外一台主机仍可以进行全部的工作, 并执行报警, 从而确保数据的完整性. 当出现故障的主机恢复正常后, 未出现故障的主机将自动把所有的数据传输至故障主机上, 将故障主机的空白数据补充完整, 至此系统恢复至正常工作状态^[7].

2 软件设计

2.1 PLC 程序设计

西门子 S7-300 系列 PLC 使用 STEP7 V5.5 的编程环境, 采用模块化的编程思想, 将不同功能的程序段分别存放在不同的 FC 块中, 提升程序的可读性.

主站程序结构主要包括主循环程序 OB1, 模拟量输入功能块 FC1, 变频器控制块 OB35 和 OB100, 数字量输出功能块 FC2, 与从站通讯功能块 FC3, 模拟量输出功能块 FC4, 主站模拟量数据存放数据块 DB1, 从站模拟量数据存放数据块 DB2, 各个需采集的工程量上限、下限、极性存放在数据块 DB3. 其中, 由于需要采集的模拟量数量较多, 故在 FC1 块中使用 STL 语言编写, 使用循环指令实现读取 AI 地址时的自动输入地址的操作. 在 STEP7 中, 4~20 mA 的电流信号对应的数字为 0~27648, 转换为工程量的公式为

$$OUT = \left[\frac{IN - K_1}{K_2 - K_1} * (HI_LIM - LO_LIM) \right] + LO_LIM \quad (1)$$

式中:

OUT: 采集到的实际工程量.

IN: 输入 4~20 mA 信号对应数字值.

HI_LIM: 工程量的上限.

LO_LIM: 工程量的下限.

单极性时

$K_1=0.0$

$K_2=+27648.0$

双极性时

$$K_1 = -27648.0$$

$$K_2 = +27648.0$$

相比多次调用 FC105 模块的传统方式,使用循环语句极大的减少了程序段的长度.在其他模块中,为了简便均采用梯形图作为编程语言. OB100 中设置 PID 的初始化参数, OB35 中根据从站采集的点火巷温度、主站采集的送风管道流量实现对变频器输出频率的双闭环 PID 控制,以使得罗茨风机工作在合理的功率^[8].点火巷温度低、送风管道流量小时,提高变频器输出频率;点火巷温度过高、送风管道流量过大时适当降低变频器输出频率.同时通过主站采集的送风管道压力来控制变频器的输出频率,当送风管道压力过高时,逐步减小变频器输出频率,适当减少送风量以减少管道压力;若送风管道压力过低,则应排查管道是否有漏风.由送风管道压力来控制的变频器输出频率优先级高于由 PID 控制的变频器输出频率优先级,这样可以实现对管道以及罗茨风机的保护,防止出现意外. FC2 中控制变频器的启动和停止以及手动控制与自动控制之间的切换. FC3 中实现与从站的数据传输功能,获得点火巷的温度值用于对变频器输出频率的 PID 控制.

相比 PID 控制,模糊 PID 具有调节迅速的优点,所以在 FC4 中控制输氧管道和蒸汽管道的阀门开度时选用模糊 PID 控制,实现对送风管道中氧气浓度和水蒸气含量的控制,反馈信号为注气管道中对氧气浓度和水蒸气含量的检测信号^[9].

从站程序结构主要包括主循环程序 OB1,模拟量输入功能块 FC1,变频器控制块 OB35 和 OB100,数字量输出功能块 FC2,与从站通讯功能块 FC3,主站模拟量数据存放数据块 DB1,从站模拟量数据存放数据块 DB2,各个需采集的工程量上限、下限、极性存放在数据块 DB3.其中,FC1 与主站程序及原理相同,在此不再赘述. FC2 中实现对点火器和气动阀门的开关控制. FC3 中实现与主站及变频器的通讯功能.

2.2 上位机监控设计

根据设计需求,上位机应实现对数据的实时显示、报警、制表打印、信息管理功能,以及对变频器、点火器、气动阀门的控制等功能.由北京亚控科技发展有限公司开发的组态王软件可以满足项目需求,故使用组态王实现上位机监控.

组态王可以通过工控机的以太网接口通过工业以太网实现与 PLC 的物理层连接,利用 OPC 技术实现与

两个 PLC 站的通讯. OPC 技术以 COM 技术为基础,具有强抗干扰能力,传输速率高,传输距离远,便于系统的组态与数据传输^[10].煤炭地下气化上位机监控系统包含自保护功能、用户管理功能、与下位机通信功能、实时显示摄像头拍摄画面、数据处理显示与处理功能、自动报警功能、数据存储功能、连接 SQL 数据库功能、数据打印功能、Web 发布功能等.将监控画面设置为开机自启动,软件启动之后屏蔽 Windows 键、ALT+F4 组合键及任务管理器,可以保障监控画面一直在前台运行状态,防止误操作将监控系统退出.

在监控系统中的用户管理功能中,建立一个工程师账户,拥有包括组态在内的所有权限;建立一个管理员账户,拥有除修改组态之外的所有权限,可以方便的对系统进行管理并防止对组态的误修改,保障系统可靠运行;建立多个操作员账户,拥有查看监控数据、打印数据、查看视频监控画面、对变频器的操作权限,没有关闭系统、停止系统运行的权限;建立多个观察员账户,仅用于查看系统数据的权限,防止对系统误操作而造成不必要的损失.

在与下位机的通讯功能中,经过测试发现通讯延迟低、无丢包,通讯质量良好,满足系统对实时性、可靠性、稳定性的要求.

在组态王中,通过使用外部扩展插件的形式,插入 OCX 通用控件,将网络高清摄像头拍摄的画面通过以太网及 OPC 技术在组态王的画面中实时显示出来无须使用另外的软件,使其融合为一个监控系统,取消传统视频显示终端电视墙和解码设备以及矩阵,使视频的显示不再需要独立的显示终端^[11],从而降低成本,提高工控机运行效率.系统数据实时显示功能将数据实时、动态的显示在监控画面上,并对异常数据高亮、变色、闪烁显示,以引起监控人员的注意,从而及时采取相应的措施.上位机还可以自动存储采集到的所有数据,生成历史数据曲线,方便直观地查看数据变化趋势.连接 SQL 数据库功能使数据可以自动导出到数据库,实现对历史数据的安全有效存储,并可以对数据利用数学方法自动进行分析,使数据反映的信息更为直观.在对数据进行监控的同时,可以通过操作员站配置的打印机将实时数据、历史数据曲线、监控画面打印出来,方便将纸质版数据资料进行存档保留.

系统采用了 ADSL 数据服务功能,通过宽带实现与广域网的连接,可以自动将数据通过 Web 发布的形式上传至云端进行存储,防止意外故障导致本地数据

丢失,使数据存储更为安全.与此同时,可以在任何地方通过对云端的访问,在得到系统权限的情况下实现对数据的监控,而不是只有在操作员站通过工控机才可以获取实时数据,使得在某些情况下对数据的获取更为方便、快捷.

2.3 SQL 数据库设计

测控系统采用 Navicat Premium 数据库管理软件,可以将采集的氧气浓度、水蒸气流量以及产出煤气的各气体组分浓度分别保存到数据库,实现对数据的快速处理.在数据库中使用双因子有交互作用方差分析统计模型,可以更加直观的得到送风管道中不同氧气和水蒸气的含量对所产生煤气气体组分的影响,大大提高了测控系统处理分析数据的能力.数据库部分采用 SQL 语言对数据库进行操作.

2.3.1 数据库建表设计框图

表 O₂ 结构、H₂O 结构和 GAS 结构如图 2、3、4:

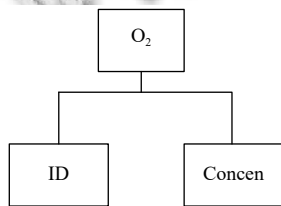


图 2 O₂ 建表结构图

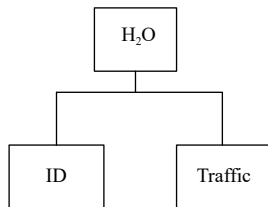


图 3 H₂O 建表结构图

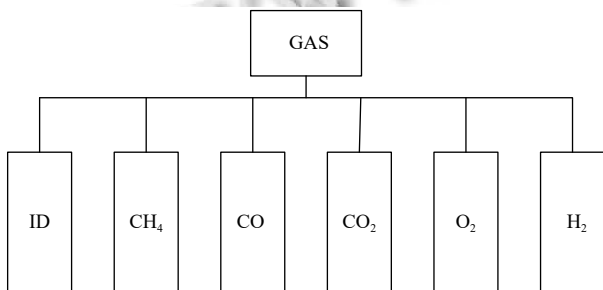


图 4 GAS 建表结构图

2.3.2 数据处理与数学模型

因送风管道氧气和水蒸气含量不同,所产生的粗

煤气气体组分不同,故处理数据时使用双因子有交互作用方差分析统计模型^[12].研究因素中有氧气(记为 A)和水蒸气(记为 B)两个可控因素, A 因素可以有 a 个不同的浓度水平,记为 A_1, A_2, \dots, A_a ; B 因素有 b 个流量水平,记作 B_1, B_2, \dots, B_b ; A 和 B 不同水平的组合记为 $A_i B_j$ ($i=1, 2, \dots, a; j=1, 2, \dots, b$), 共 ab 个, 每个组合第 k 次实验观测值记为 X_{ijk} , 结果记录如表 1 所示. μ 表示所有期望值的平均值, 水平 A_i 和 B_j 对实验结果的效应记为 $\alpha_i = \mu_{i\cdot} - \mu$ 和 $\beta_j = \mu_{\cdot j} - \mu$, 实验误差记为 $\varepsilon_{ij} = X_{ij} - \mu_{ij}$, 则可建模为

$$X_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}; \mu = \frac{1}{ab} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \mu_{ij}$$

$$\sum_{i=1}^a \alpha_i = 0; \sum_{j=1}^b \beta_j = 0; \sum_{i=1}^a (\alpha\beta)_{ij} = 0; \sum_{j=1}^b (\alpha\beta)_{ij} = 0;$$

$$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2) \quad (2)$$

表 1 实验结果示意图

水蒸汽浓度	氧气浓度			
	A_1	A_2	A_a
B_1	X_{111}	X_{211}	...	X_{a11}

	X_{11n}	X_{21n}	...	X_{a1n}
.....			
B_b	X_{1b1}	X_{2b1}	...	X_{ab1}

	X_{1bn}	X_{2bn}	...	X_{abn}

通过检验以下假设是否成立可以判断因素 $A, B, A \times B$ 对实验结果的影响情况:

$$H_{01}: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a = 0;$$

$$H_{02}: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0;$$

$$H_{03}: (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b).$$

分析情况见表 2, 其中

$$\left\{ \begin{aligned} S_E &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n (X_{ijk} - \bar{X}_{i\cdot\cdot})^2 \\ S_A &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n (\bar{X}_{i\cdot\cdot} - \bar{X})^2 \\ S_B &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n (\bar{X}_{\cdot j\cdot} - \bar{X})^2 \\ S_{A \times B} &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n (\bar{X}_{ij\cdot} - \bar{X}_{i\cdot\cdot} - \bar{X}_{\cdot j\cdot} + \bar{X})^2 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

根据上述数学模型, 在上位机画面中输入送风管

道中不同的氧气浓度和水蒸气含量的组合,系统就可以自动的记录并处理数据,在对同一水平的氧气浓度和水蒸气含量进行三到四次测试后,可将数据分析结

果记录在数据库中并反馈至上位机.当再次需要相同气体组分的煤气时,输入相应组分参数后系统可自动配置氧气浓度和水蒸气含量,使产生的煤气组分更为精确.

表2 有重复的双因素试验方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	F 值临界值
因素 A	S_A	$df_A=a-1$	$MS_A = \frac{SS_A}{df_A}$	$F_A = \frac{MS_A}{MS_E}$	$F_{\alpha}((a-1), ab(n-1))$
因素 B	S_B	$df_B=b-1$	$MS_B = \frac{SS_B}{df_B}$	$F_B = \frac{MS_B}{MS_E}$	$F_{\alpha}((b-1), ab(n-1))$
A×B	$S_{A \times B}$	$df_{A \times B}=(a-1)(b-1)$	$MS_{A \times B} = \frac{SS_{A \times B}}{df_{A \times B}}$	$F_{A \times B} = \frac{MS_{A \times B}}{MS_E}$	$F_{\alpha}((a-1)(b-1), ab(n-1))$
误差	S_E	$df_E=abk$	$MS_E = \frac{SS_E}{df_E}$		
总和	S_T	$df_T=abk-1$			

3 结语

现在,清洁能源的使用越来越广泛,煤炭地下气化技术的发展与推广将会越来越迅速.在贵州盘江精煤股份有限公司的山脚树矿煤层气地下气化关键技术及产业化示范研究中所设计的基于西门子 S7-300 系列 PLC 的测控系统,其可靠性高,抗干扰能力强,能适应多粉尘、潮湿等恶劣作业环境.在近半年多的实际运行中表明,测控系统采集数据准确、控制功能可靠,能对所有的数据进行实时采集、备份、处理、发布到云端,可以对所生产的煤气气体组分进行精确的控制,在具有相应权限的情况下可实现远程数据监测,具有高度的稳定性,可以满足煤炭地下测控系统的测控要求,具有较大的推广和使用价值.本设计已经成功在隶属于贵州盘江精煤股份有限公司的山脚树矿成功运行近一年时间.

参考文献

- 黄温钢. 残留煤地下气化综合评价与稳定生产技术研究 [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- 王作棠, 周华强, 谢耀社. 矿山岩体力学. 徐州: 中国矿业大学出版社. 2007.
- 甘能. 基于 PLC 控制技术在工业自动化中的应用研究. 电子技术与软件工程, 2015, (6): 159-160.
- 郭建桥. 提升 PLC 系统中模拟量信号传输质量的方法. 自动化应用, 2013, (8): 23-50.
- 陈瑜, 王孟效, 汤伟. PLC 控制系统中模拟量信号采样和滤波及其 Step7 语言实现. 电气自动化, 2006, 28(5): 68-71. [doi: 10.3969/j.issn.1000-3886.2006.05.024]
- 南新元, 陈飞, 李泉. S7-300 PLC 软冗余系统性能实验研究. 实验技术与管理, 2013, 30(6): 17-19, 23. [doi: 10.3969/j.issn.1002-4956.2013.06.005]
- 王宝英, 梅春燕, 柳惠秋. 双机冗余在工业控制系统中的应用. 自动化博览, 2006, (6): 56-57. [doi: 10.3969/j.issn.1003-0492.2006.06.019]
- 李泽宇. 基于卡尔曼滤波和双闭环 PID 控制的平衡车控制系统设计. 电子世界, 2018, (1): 100-102.
- 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166-172.
- 石灵丹, 华斌, 朱歆州, 等. 基于 OPC 技术的 PC 与西门子 PLC 的实时通讯. 船电技术, 2011, 31(1): 9-12. [doi: 10.3969/j.issn.1003-4862.2011.01.003]
- 孙海龙, 张俊波. 基于组态王的视频内嵌在井下信集闭中的应用. 数字技术与应用, 2013, (2): 80.
- 王苗苗. 双因素方差分析模型的构建及应用. 统计与决策, 2015, (18): 72-75.