

基于光纤感温的智能防灭火控制系统研究

万 勇^{1,2}

(1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039;

2. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 重庆 400037)

摘要:针对当前多数煤矿胶带运输防灭火系统存在的主要靠传统的人工巡检测温及手动控制工作劳动强度大、人员数量多、系统运行稳定性不高等问题,提出了一种基于光纤感温的智能防火无人值守控制系统研究。实现了煤矿皮带运输过程中多源火灾相关系统监测信息的统一动态采集、融合分析和预测预警、智能联动、统一控制。当监测区域发生火灾隐患时,智能防灭火控制系统能实现与防灭火系统的融合联动灭火功能,减轻了胶带运输系统人工巡检劳动强度、有效降低了火灾事故风险、全面提升了煤矿安全、生产管控能力与信息化水平,为煤矿安全生产活动带来显著的经济效益和社会效益,对煤矿企业智慧化矿山建设具有重要的积极意义。

关键词:防灭火监测监控;胶带运输;光纤感温;无人值守;智能化控制

中图分类号:TP2;TD712.63

文章编号:1000-0682(2024)06-0044-06

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.06.009

Research on intelligent fire prevention and control system based on optical fiber temperature sensing

WAN Yong^{1,2}

(1. China Coal Technology and Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400037, China)

Abstract: Based on the experience of designing and implementing fiber optic temperature sensing based fire prevention and extinguishing systems in recent years, a research on an intelligent unmanned control system for fire prevention and extinguishing based on fiber optic temperature sensing is proposed to address the problems of traditional manual inspection, temperature measurement and control, high labor intensity, large number of personnel, and unstable system operation in most coal mine belt transportation fire prevention and extinguishing systems. It realizes the unified dynamic collection, integrated analysis, prediction and early warning, intelligent linkage and unified control of monitoring information of multi-source fire-related systems in the process of coal mine belt transportation. When fire hazards occur in the monitoring area, it realizes the integrated linkage fire extinguishing function with the fire prevention and fire extinguishing system. It has reduced the labor intensity of manual inspection of the belt transportation system, effectively reduced the risk of fire accidents, comprehensively improved the ability of coal mine safety and production control and informatization, brought significant economic and social benefits to coal mine safety production activities, and achieved good application results. It has a positive and important significance for the intelligent mine construction of coal mining enterprises.

Keywords: fire prevention; tape transport; fiber temperature sensing; unattended; intelligent control

收稿日期:2024-05-07

基金项目:天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目:环境参数高精度传感技术及装备(2023-TD-ZD005-002)

第一作者:万勇(1980—),重庆垫江人,本科,高级工程师,主要从事胶带运输机光纤测温系统、瓦斯抽采系统监控及自动控制、智慧化数字矿山等方面的研究与技术推广工作。E-mail:280210058@qq.com

0 引言

随着社会快速发展及煤炭资源的不断开发,煤矿井下设备的自动化程度越来越高,胶带输送机的使用数量不断增加,其具有运输距离长、输送量大、耗电量低及磨损小等优点^[1],是矿井高效生产的有力保障,在井下运输中发挥着重要作用;但是输送机时常出现胶带打滑、跑偏和堆煤等情况,会产生足够多的热量导致局部温度过高,加上井下空间密闭,周围有着众多机电设备及余煤碎屑,同时井下煤层内部蕴含着瓦斯及其他易燃易爆气体^[2],存在较大的火灾隐患。如果火灾不能及时的扑灭,所产生的高温烟流及有毒气体无法及时排出,容易导致人员中毒或窒息,甚至破坏人体体温调节系统,严重威胁井下工作人员生命安全。为了推动矿井胶带输送机火灾的预防与治理,减少经济损失和人员伤亡,有必要对矿井皮带火灾演化规律及防灭火技术进行研究,结合通风系统和灭火系统,在火灾发生前期尽可能抑制其发展,最大程度的减少煤炭企业人员财产损失。

煤矿防灭火是保障煤矿安全生产的治本措施,煤矿智能防灭火监测监控是保障皮带运输系统正常运行的重要手段。为提高煤炭企业深入贯彻落实《国家安全监管总局关于开展“机械化换人、自动化减人”科技强安专项行动的通知》(安监总科技[2015]63号)精神,基于分布式的光纤智能感温煤

矿防灭火监控系统,根据胶带输送机火灾发展时期产生的温度、烟雾及火灾特征气体等早期迹象,通过各类传感器采集的实时数据按照中心站软件预先设定的监测预警、报警及早期识别控制等层级,准确检测现场环境、胶带机、皮带长廊、机电硐室、电缆隧道、工作面、采空区等温度场变化趋势,具有“点域+面域”温度连续定位温度异常区域的功能,并结合烟感、火灾特征气体、视频等实现对火灾隐患的精准监测与定位,有助于决策者指导开展精准防火措施的实施^[3],将可能发生的火灾危害引起的经济损失降低至最低程度,既是改变煤矿火灾安全面貌和防止重大火灾事故的重要手段,又是智能化矿山建设的重要环节之一^[4]。

1 光纤感温及灭火系统概述

火灾监控系统是煤矿企业火灾预警监控系统的子系统之一,主要面向煤矿、洗煤厂、非煤矿山等领域,重点对胶带输送机、机电硐室、动力电缆、采空区等重点火灾监控区域的温度变化、烟雾状态、火灾特征气体等指标进行实时监测^[5],实现火灾监测和预警,并保障企业实现安全高效生产。主要由地面的调度防灭火控制主机、DTS数据分析主机、中心站软件、环网交换机平台、井下的矿用本安型监控分站、隔爆兼本安型光纤测温主机、电动阀门、喷雾洒水装置、自承式测温光纤、温度及烟雾等各类传感器组成。其结构框图如图1所示。

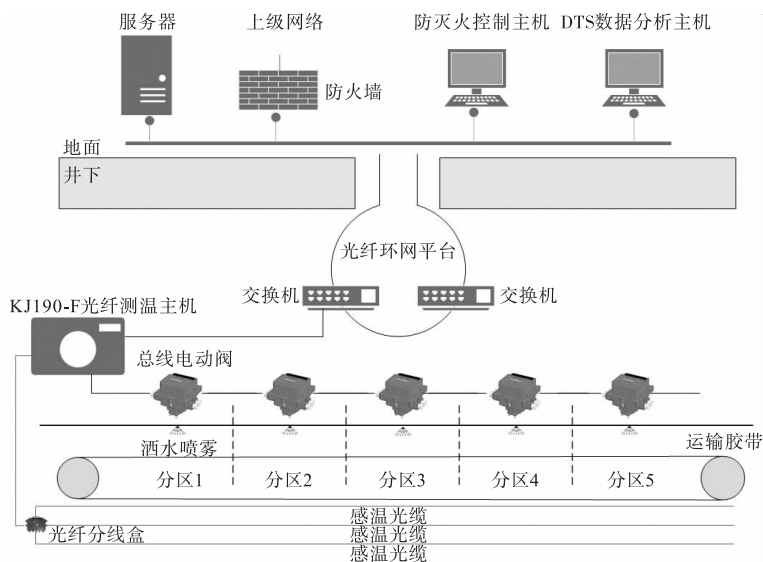


图1 矿用分布式光纤测温及灭火系统

2 总体方案设计

2.1 地面调度室软件

调度室设置高性能防灭火控制主机及 DTS 数据分析主机各 1 台,均配套正版 windows 操作系统和 SQL server 数据库;部署安装矿用分布式光纤测温及灭火联动中心站软件,软件采集的全部实时数据按照煤炭企业用户相关要求并入全矿井智能化管控平台和灾害预警平台;系统建成后并入矿原有皮带集中控制系统中,并将监测数据通过 EIP 协议接入矿井现有智能化管控平台和综合灾害预警平台,实现多源火灾相关系统监测信息的统一动态采集、融合分析和预测、预警、智能联动、统一控制,当监测区域发生火灾隐患时,实现防灭火系统的融合联动灭火功能与矿井综合管控平台统一管控。

中心站软件基于模块化设计,采用 C/S 或 B/S 架构,模块之间相互透明访问,同一台终端设备或者网络上不同的设备运行的模块之间都能够基于 TCP/IP 无缝通信;系统软件接口和通信协议通过开放的 Modbus, TCP/IP, Profibus, OPC, ODBC, FTP 和 DB 等标准协议规范化开发,系统与外部设备、外部系统之间的接口提供统一的开发模板和应用接口以支持专用通讯接口的接入^[6]。具有预报警功能,当光纤探测到被监测物出现温度上升异常信息后,20 s 之内将火灾信息传到控制单元,30 s 之内将火警传到调度室软件及相关系统平台,并发出声、光报警信号,提醒值班人员注意及采取相应措施。报警提示满足国标线性感温指标,能够全天候 24 h 无间隙检测电缆温度情况无漏报,误报率也满足规范要求。系统软件人机界面如图 2 所示。



图 2 系统软件人机界面

2.2 传输网络

利用矿井目前已建设的工业以太环网及井下所有环网交换机空余光、电接口,将光纤测温主机和监控分站的主通讯直接使用光缆或阻燃网线连接,将各传感器数据、电动阀门装置与地面调度中心进行监测、控制的双向数据交互。

2.3 井下胶带运输机配套硬件

在主斜井强力皮带及其它辅助运输巷道皮带机头处安设 1 台光纤测温主机,皮带两侧分别敷设感温光缆以覆盖整条运输皮带沿线,以此满足连续不间断监测感温光纤所在的位置区域温度变化趋势及全部数据的采集及传输。当所处监测区域发生温度异常升高时,主机就地自动进行数据分析、逻辑判断,根据报警分区预先设置参数判识温度绝对值、相对值及温升斜率报警等,发出报警信息并准确显示

报警发生区段,同时与地面中心站软件及防灭火系统智能联动。

沿着皮带全覆盖的安设喷雾洒水灭火装置,利用矿井现场内预先敷设的消防水管,在皮带机头、机尾、转载及驱动部分别设置一组电动阀门装置及全断面洒水装置,其余皮带每间隔 50 m 设置 1 个电动阀门执行器,每间隔 100 m 配置全断面洒水装置,每间隔 50 m 配置沿线洒水装置各一套。

在皮带机头、机尾、转载和驱动部等重点位置分别设置 1 台红外温度传感器、1 台烟雾传感器、1 台一氧化碳传感器,整条皮带沿线中部合适位置分别设置 2 台烟雾、2 台一氧化碳,同时在机尾设置 1 台管道压力传感器,以监测整部胶带运输机的实时环境参数及消防水管供水压力,当出现火情异常时能自动进行喷雾洒水灭火。

3 实施方案

3.1 分布式光纤测温及定位原理

分布式光纤测温系统 (distributed temperature sensing, DTS) 的测温原理主要是基于光时域反射技术和拉曼光谱散射效应, 拉曼散射是由于光纤分子的热振动引起的, 它会产生比光源波长更长的斯托克斯 (Stokes) 光和更短的反斯托克斯 (Anti-stokes) 光。光缆外部温度的变化会影响光纤中的反斯托克斯光强度, 又因两种光的强度比值对温度非常敏感, 所以利用其与温度有关的物理规律可以用来绝对指示温度, 通过检测这种比值的变化, 可以实现对沿光纤温度场的分布式测量。再利用光纤中的激光雷达技术进行距离定位, 采用长距离矿用铠装光缆作为温度传感器, 可以实现大范围、长距离的探测光纤不同位置的温度的变化, 实现真正分布式的实时温度监测。光纤自身是不导电也不带电的, 它在系统中肩负着温度传感及数据传输的双重功能, 所处的各温度场调制了光纤的背向拉曼光谱散射光的强度, 首先通过光电检测器和波分复用器进行空间温度的数据采集, 接着进行数据信号的解调处理, 然后从噪声中把温度信息提出来, 最后通过光波的传播速度和背向光回波的时间间隔差来定位被测温度的所在位置^[7-12]。其工作原理如图 3 所示。

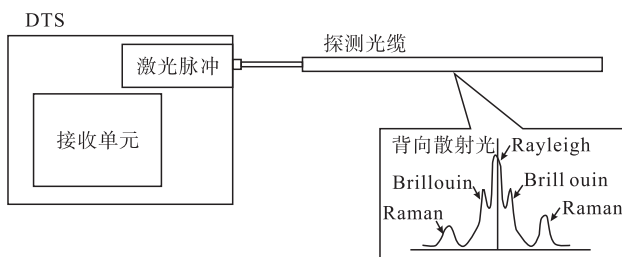


图 3 DTS 测温原理

斯托克斯 (Stokes) 光强:

$$P_s(z) = P_o K_s e^{-a_s z} e^{-a_s z} \quad (1)$$

反斯托克斯 (Anti-stokes) 光强:

$$P_A(z) = P_o K_A e^{-a_s z} e^{-a_A z} \frac{X}{X-1} \quad (2)$$

式中: $X = e^{\frac{hV}{k_B T(z)}} = e^{\frac{V}{T(z)}}$; V 为光纤拉曼偏移波数; h 为普朗克常数。

根据上式, 求解出温度:

$$T(z) = \frac{V}{\ln(R(z)) / k e^{a_s z}} \quad (3)$$

DTS 定位的原理是利用光时域反射仪 (optical time domain reflectometer, OTDR) 光在光纤中传播时产生的后向散射光来获取衰减的信息, 测量返回输

入端的散射光与反射光的合成光功率的时间函数, 可用于测量光纤衰减、接头损耗、光纤故障点定位以及了解光纤沿长度的损耗分布情况等, 同时也是分布式光纤传感器的基础, DTS 定位原理如图 4 所示。

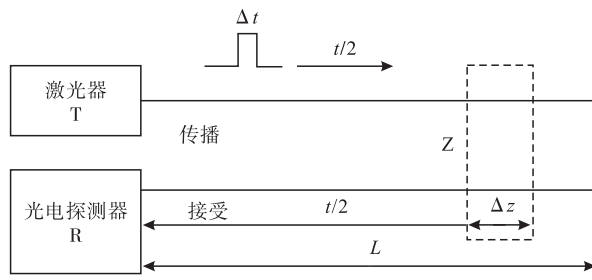


图 4 DTS 定位原理

激光器 T 和光电探测器 R 为同一根光纤 (图中 2 条通道是为了清楚说明原理表示成不同的 2 条通道), 设光纤总长度为 L , 假定在距激光源长度 Z 处 (长度为 Δz) 的一段光纤发射并注入一个很窄的高强度激光脉冲, 光在传播时产生的后向散射光, 经过一段时间后返回被光电探测器检测到, 注入光脉冲时开始计时, 当光到达 Z 处时散射光返回到发射点, 则产生散射的位置和该点散射光返回入射点所用的时间具有以下数量关系^[13-18]:

$$z = \frac{1}{2} vt = \frac{1}{2} \frac{c}{n} t \quad (4)$$

式中: t 为注入光脉冲点到返回发射点的时间; z 为光纤散射位置; c 为真空中光速; v 为光纤中光速; n 为光纤折射率。

3.2 光纤测温主机及感温光缆选型

根据不同安装位置差异情况, 光纤测温主机一般分为室内一般型、户外型和防爆型三类。由于安装在煤矿井下属于防爆区域, 则须选择矿用隔爆兼本安型主机, 每台主机为 4 通道, 每通道感温光缆承载长度能力为 4 km 以上。

感温光纤是系统中重要组成部分, 主要充当温度传感器作用。系统采用的测温光纤与传统通信光纤不同, 必须具备 3 个方面的优越性能: (1) 光缆应具有良好的温度感测特性, 即快速的温度感应能力; (2) 光纤在 4 km 长距离传输后衰减要低, 传输性能要强; (3) 光缆应具备与煤矿井下环境相适应的抗机械拉伸、抗机械冲击能力、良好的机械弯曲特性和阻燃特性。因此针对煤矿井下巷道的工况条件情况和光缆的属性要求, 所以在光缆表层设计增加了适当厚度的矿用阻燃材料护套和不锈钢松套管外护套, 同时添加芳纶纱以提高内部光纤的抗拉强度; 包裹光纤的阻燃材料护套和不锈钢外护套对来自光缆

两侧的压力冲击予以缓解,使其能承受高强度、高对抗的挤压,且纵向及横向均不渗漏水,具有卓越的防咬噬等性能,在湿度大、粉尘多、冲击挤压等较恶劣条件下能长时间使用,该系统带式输送机等区域沿线选用无卤素的阻燃护套的自承式感温光缆,减少钢丝绳加强吊挂,可靠性高。

3.3 皮带沿线光缆敷设

在井下巷道内带式输送机皮带支架两侧区域各敷设一条自承式感温光缆,保证因托辊高速旋转导致超温引燃皮带支架底部的粉末、煤灰而产生火灾隐患的精准监测。即在防灭火控制系统软件的电子地图上,首先按照一定比例模拟还原出皮带现场的所有托辊架、标识牌位置等信息,其次将敷设的感温

光缆在电子地图上按区段进行报警位置预设,然后与模拟还原现场的托辊架编号、标识牌悬挂位置信息保持一致,以确保系统在实际运行期间根据弹出的报警位置进行追踪排查井下现场实际报警的具体位置。如果在皮带正上方巷道铺设压风、消防水以及供排水管道等情况,且管路距离皮带承重面距离较远($930\text{ mm} \leq L \leq 1030\text{ mm}$),由于安装不便、测温效果可能较差、后期维护难度较大,可以将光缆通过捆扎、粘贴等方式安装在皮带两侧的槽钢上($600\text{ mm} \leq L \leq 1000\text{ mm}$),在带式输送机机架槽钢内侧免焊接装配感温光缆夹具,用于敷设拉紧感温光缆,固定拉紧间距不大于 3 m,安装示意图如图 5 所示。

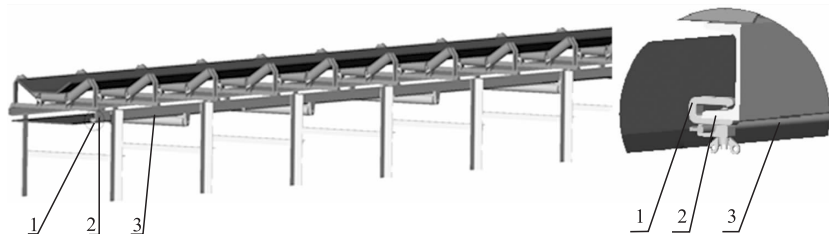


图 5 沿槽钢下沿敷设感温光缆

3.4 沿线自动喷雾洒水装置

利用皮带沿线敷设的消防水管和阀门,在皮带机头、机尾、转载、驱动部以及沿线每隔 100 m 处各设置一组电动阀门和全断面洒水装置,用于控制阀门来实现皮带沿线定点全断面洒水,同时在皮带沿

线每隔 50 m 设置 1 套洒水降温喷雾套件,配套 10 个喷嘴。通常情况下将喷雾架固定在管路横面上采取捆扎方式固定;阀门电动装置安装在皮带两侧巷道非行人通行巷道一侧岩壁上,实现皮带沿线洒水灭火装置全覆盖。其安装示意图如图 6 所示。

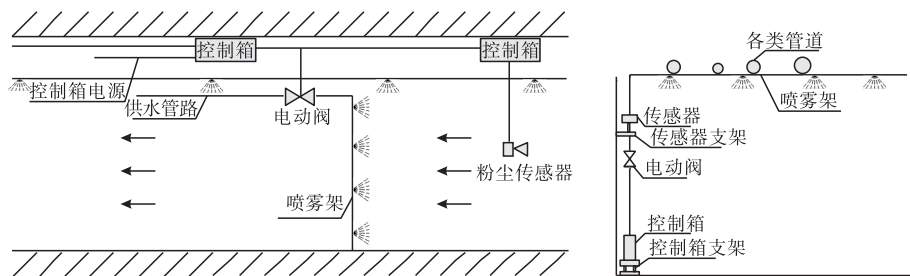


图 6 自动喷雾灭火系统安装布置示意图

3.5 联动控制灭火

根据 2022 版《煤矿安全规程》第 249 条“井下消防管路系统应当敷设到采掘工作面,每隔 100 m 设置支管和阀门,但在带式输送机巷道中应当每隔 50 m 设置支管和阀门”的规定,光纤测温系统对带式输送机沿线按照每隔 50 m 设置一个分区进行标注及温度测量,当系统监测某一个分区出现温度、一氧化碳超限报警及烟雾状态报警时,系统立即向该分区及前后一个分区下发联动指令,对应分区的监控分站通过触点控制阀门电动装置实现该分区洒水

装置自动洒水灭火。

4 现场试验运行及结果

根据前文论述方法,设计制作了光纤测温主机、电动阀门装置、全断面洒水装置及相关传感器设备,在煤矿主斜井皮带运输巷进行现场工业性试验,完成现场设备部署及软件安装调试正常后系统开始投入运行,光纤测温主机能及时与地面调度室软件建立通信,电动阀门、洒水装置状态信息及各类型传感器实时监测现场环境参数数据正常上传至系统软

件,通过组态图、监测列表等多种方式直观清晰地展现各监测区域温度;通过历史数据列表、温度-时间曲线等方式展示监测区域温度的变化情况与趋势;对关键位置的温度进行跟踪分析,以列表形式展示其异常情况发出的预警或报警信息,并建立温度监测与数据分析模型、预警/报警联动预案,当发生预警/报警时通过联动预案控制洒水阀门、喷粉(气)灭火装置等设置进行降温或灭火处理。系统正常运行近一个月,并且在皮带沿线现场人为制造模拟温度、烟雾及一氧化碳数据超限条件时,系统完全能自动触发并打开洒水装置喷雾灭火,满足现场实际需求。

5 结语

通过引入光纤感温技术,研究制作了相应的硬件装备,建立了智能防灭火控制在线监测管控平台,在胶带运输机上成功实现了光纤测温主机与皮带沿线测温光缆、烟雾、一氧化碳及压力等传感器监测装置的联动功能,系统具有连续监测、温度变化全面感知、数据采集分析、逻辑判断、温升斜率报警、分区报警及故障自动诊断等功能,当皮带沿线监测某区域出现了温度异常升高时,系统自动发出报警,准确显示报警发生位置,一旦发现火灾隐患立即与矿防灭火系统智能联动,启动相应洒水装置对其进行精准自动灭火处理,全过程信息化管理、全系统一体化管控,操作方便,反应迅速。

系统提高了矿井防灭火治理水平,解决了全靠安装传统点式温度传感器、沿线人工巡检、数据纸质记录及分析等工作存在的难点和技术缺陷,通过采用智能感知、故障诊断、自动控制、信息通信技术,代替固定人员值守,实现主运输系统的智能监测监控和人员巡检,减少人员 80% 以上,是煤矿企业贯彻安监总局 2015 年颁布的 63 号文件提出的“机械化换人、自动化减人”要求的具体落实^[19]。减轻了人工日常徒步巡检的劳动强度,为煤矿企业减员增效起到了积极有效的途径,提供了煤矿在防灭火治理工作中强大的数据支持及网络化管理体系,有效降低火灾事故风险,取得了良好的应用效果,全面提升煤矿安全与生产管控能力与信息化水平,为煤矿安全生产活动带来显著的经济效益和社会效益^[20],得到了各级领导的一致认可及好评,对煤矿企业智慧化矿山建设具有积极推动作用。

参考文献:

[1] 张克亮. 基于分布式光纤的矿用带式输送机温度监测

系统设计与应用[J]. 电气自动化, 2023, 52(02): 228-232.

[2] 李军. KJ190 型带式输送机温度监测系统在煤矿的应用[J]. 煤矿机电, 2014(03): 107-110.

[3] 王腾飞. 矿用带式输送机智能化控制系统设计与应用[J]. 煤矿机械, 2020, 41(12): 183-186.

[4] 傅振云. 基于光纤测温的井下带式输送机火灾优化报警设计[J]. 能源技术与管理, 2020, 45(4): 171-172+177.

[5] 时培源, 邓高鹏. 分布式光纤测温系统在陈四楼煤矿的应用[J]. 河南科技, 2023, 42(17): 10-13.

[6] 单亚锋, 马艳娟, 付华, 等. 分布式光纤测温系统在煤矿火灾监测中的应用[J]. 传感技术学报, 2014(5): 704-708.

[7] 王明重, 吕辰, 夏腾飞. 分布式光纤测温技术在采空区火灾预警中的应用[J]. 中州煤炭, 2014(3): 62-64.

[8] 王秋冬, 雷美荣, 张艳军, 等. 井下皮带防灭火机器人的设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2023(05): 60-63.

[9] 张德森. 煤矿采空区关键参数实时在线监测系统应用研究[J]. 能源科技, 2023, 21(03): 71-75.

[10] 吴乐. 矿井地面风井远程集控系统设计与关键技术[J]. 山东煤炭科技, 2023, 41(04): 209-211.

[11] 陈一兵. 智能主煤流运输系统研究与应用[J]. 煤矿机械, 2022, 43(08): 154-157.

[12] 苟怡, 郭清华. 分布式光纤测温系统温度与定位补偿算法研究[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(04): 83-86+98.

[13] 韩子彬. 光纤测温系统在选煤厂中的应用[J]. 陕西煤炭, 2018, 37(04): 77-81.

[14] 樊荣, 侯媛彬, 张代, 等. 基于神经网络的带式输送机火灾预警算法[J]. 工矿自动化, 2012, 38(9): 70-74.

[15] 于庆. 分布式光纤测温技术在煤矿中的应用[J]. 工矿自动化, 2012, 38(4): 5-8.

[16] 田兵. 矿用分布式光纤测温系统软件设计与实现[J]. 中州煤炭, 2016(08): 105-109.

[17] 何炜斌, 廖维君, 薛志亚, 等. 基于分布式光纤测温的电力电缆在线监测技术研究[J]. 广东电力, 2013, 26(5): 23-26.

[18] 杨栋. 分布式光纤测温探测器对电缆桥架火灾探测的应用研究[C]. 北京: 中国消防协会科学技术年会出版社, 2015.

[19] 万勇. 矿用隔爆型电动阀门执行器在煤矿瓦斯抽放系统中的应用研究[J]. 能源与环保, 2017, 39(07): 39-45.

[20] 万勇. 矿用隔爆型电动阀门执行器的研发与应用[J]. 自动化仪表, 2017, 38(08): 55-58+63.