

分布式矿井粉尘浓度在线监控系统

王雪瑞¹, 李艳玮¹, 李栓保²

(1. 河南工程学院 计算机学院, 河南 新郑 451191; 2. 河南财政税务高等专科学校 信息工程系, 郑州 451464)

摘要: 为解决矿井中粉尘浓度测量精度低和在线监测难的问题, 利用电荷感应原理设计了高精度矿井粉尘浓度传感器, 使输出的感应电流与粉尘浓度之间建立了良好的线性关系; 采用三级管理结构设计了分布式矿井粉尘浓度在线监控系统, 系统主要由粉尘监测节点、风机控制器、数据汇聚基站、监控中心和传输网络组成; 粉尘监测节点与数据汇聚基站通过 ZigBee 网络组成星型结构, 定时采集周围环境中的粉尘浓度信息, 并发送给数据汇聚基站; 数据汇聚基站与监控中心采用 C/S 架构设计, 将接收到的各监测节点数据打包后, 通过局域网实时发送到监控中心的服务器上; 监控中心接收、处理、分析和显示从各终端发来的数据, 并将存入数据库 ACCESS2003 中; 当某区域出现粉尘浓度过高时, 会自动发出报警信号, 并控制对应的风机加大排风量, 使粉尘浓度保持在安全范围; 通过测试实验结果表明, 设计的粉尘浓度传感器具有较高的测量精度, 平均误差仅为 2.95%, 且粉尘浓度在线监控系统工作稳定可靠。

关键词: 矿井粉尘; 电荷感应原理; 在线测量; 自动控制; 报警

Distributed Mine Dust Concentration On-line Monitoring System

Wang Xuerui¹, Li Yanwei¹, Li Shuanbao²

(1. College of Computer Science and Technology, Henan Institute of Engineering, Xinzheng 451191, China;

2. Department of Information Engineering, Henan College of finance and Taxation, Zhengzhou 451464, China)

Abstract: To solve the problem of low measurement accuracy and on-line monitoring for the mine dust concentration, the high-precision mine dust concentration is designed with the charge induction principle, whose output induced current has a good linear relationship with the dust concentration. The distributed mine dust concentration on-line monitoring system composed of dust monitoring nodes, fan controller, data station, monitoring centre and transport network is designed using three levels management structure. The dust monitoring nodes make up a star structure with the data station via ZigBee network, and collect the dust concentration in the surrounding environment, sending them to the data station periodically. The data station connection to the monitoring centre is designed with C/S architecture, receives the data from all the monitoring nodes and send them to the server in the monitoring centre after packing. The monitoring centre receives, processes, analyzes and displays all the data from data station, and at last store them to the Data Base ACCESS2003. It can send out alarming automatically when the high concentration of dust occurs in an area, and controls the corresponding fan increase more work so that the dust concentration can be kept in a safety range. The test results show that the designed dust concentration sensor has a high accuracy with the average error of only 2.95%, and the dust concentration on-line monitoring system works reliable.

Keywords: mine dust; charge induction principle; on-line measurement; automatic control; alarming

0 引言

在采煤作业的过程中, 巷道内会产生大量的粉尘, 不仅污染环境, 还会对工作人员的健康造成极大的危害, 因此有必要及时有效地监测生产过程中产生的粉尘, 通过采取有针对性的除尘降尘措施, 有效确保作业人员的安全和健康^[1-3]。目前常用的粉尘浓度测量方法有天平称重法、 β 射线法、光学测量法和电荷感应法, 天平称重法是最基本的测量方法, 但不能用于粉尘浓度的连续监测; β 射线法测量准确, 但需要先对粉尘进行采用后对比测量, 也难于实现在线测量^[4]; 光学测量法包含光散射法和光吸收法, 虽然可以实现在线测量, 但容易使光学元件受污染影响测量精度; 由于电荷感应法能够实现粉尘的连续测量, 环境适应性强, 具有测量范围宽和较高的测量精度, 采用电荷感应法设计了粉尘浓度传感器, 又利用三级管理结构设计了分布式矿井粉尘浓度在线监控系统, 使矿井下的粉尘浓度

实时上传到监控中心进行处理、显示和存储, 当监测到粉尘浓度过高时, 会发出报警信号, 并自动控制风机的排风量, 使粉尘浓度降到安全范围^[5]。经过实验证明, 设计的粉尘浓度传感器感应电流与测量的粉尘浓度之间具有良好的线性关系, 误差小, 精度高, 便于维护, 粉尘浓度在线监控系统工作稳定可靠, 能有效提高煤矿工人的工作环境质量, 保证煤矿的安全生产。

1 电荷感应粉尘传感器设计

粉尘在气流中流动时由于颗粒之间的撞击、摩擦和分离, 颗粒与管壁或容器壁之间的撞击摩擦, 或者与气体介质之间的摩擦都会使粉尘颗粒带上电荷, 根据这一特性设计了粉尘浓度传感器^[6]。粉尘浓度传感器主要由测量管段、电荷感应探头电极、小风机和信号放大调理电路组成。电荷感应粉尘浓度传感器结构如图 1 所示。测量管段为圆筒形, 采用不锈钢材质制作, 内径为 80 mm, 长度 200 mm。电极是电荷感应法粉尘浓度传感器的关键部件, 国内外的常见电极有棒状、内环状和外环状 3 种形式^[7]。系统选用最简单的棒状电极, 电极外表喷涂陶瓷绝缘材料, 可以避免粉尘与电极通过摩擦起电方式产生的感应电荷干扰测量结果, 又能对电极形成保护, 避免粉尘磨损电极。

测量管道的主要作用是提供一个相对密封的环境, 使粉尘

收稿日期: 2014-03-22; 修回日期: 2014-05-02。

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究项目(122300410061)。

作者简介: 王雪瑞(1977-), 女, 河南登封人, 讲师, 硕士, 主要从事嵌入式系统与计算机应用方向的研究。

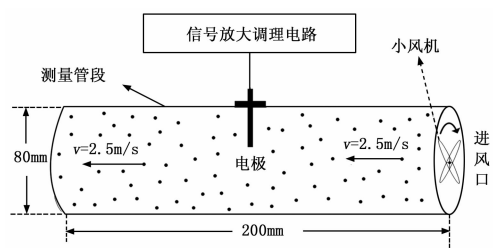


图 1 电荷感应粉尘浓度传感器结构图

经过电极，另外金属测量管段与电极相连，等效为电容的一极，有效屏蔽外界干扰。测量管道的另一端安装一台小风机，主要作用是测量管段内提供动能，使粉尘能以一定的风速通过电极；当粉尘通过金属探头附近时，根据电荷的库伦定律和泊松分布原理，在金属电极上感应出对应的正负电荷，电荷在电极中的转移运动形成电流信号。通过选择合适的风机型号，使通过测量管道的粉尘速度约为 2.5 m/s 的风速，保证了感应电流与粉尘浓度大小高度相关，且呈良好的线性关系。

由于产生的电荷正负极性均有，故电流信号是交流电信号，此电信号和粉尘质量含量存在直接的数学关系。通过检测到的电流与固体质量流量的比例和检测入口单位质量固体所带电荷 $(\frac{q}{m})_0$ 成线性关系，而且与粉尘颗粒在空间内的分布无关。粉尘颗粒的质量流量 W_p 与检测到的电流 I_m 近似呈如下关系式 (1)：

$$|I_m| = W_p \left| \left(\frac{q}{m} \right)_\infty - \left(\frac{q}{m} \right)_0 \right| \times \exp \left(-\frac{n(x)}{n_0} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{n(\Delta x)}{n_0} \right) \right]$$

(1)

式中， x 为粉尘的流动长度； $(\frac{q}{m})_0$ 和 $(\frac{q}{m})_\infty$ 分别为 $x = 0$ 和 $x = \infty$ 时单位质量粒子的带电量； $n(\Delta x)$ 为在流动长度 Δx 区间内的一个粒子与测量管壁的碰撞次数； n_0 为调和撞击次数。近似得到式 (2)：

$$|I_m| = a \cdot u^{-b} C$$

(2)

式中， a, b 为常数，与测量管壁所在位置及管道中的物质有关， C 为粉尘浓度， u 是风速。 a, b 可通过标定的方式确定，从式 (2) 中可以看出感应电流与粉尘浓度大小相关，在风速一定时呈线性关系。电流 I_m 经过放大、滤波和调理后，能够被准确的测量，根据式 (2) 就可得到粉尘浓度 C 。

2 系统总体结构

2.1 传输网络规划

为了获取很多区域的粉尘浓度信息，就需要布置更多的监测点，显然在矿井巷道内布置大量的走线是不现实的。ZigBee 是一种基于 IEEE802.15.4 无线个人域网标准的技术，它具有低功耗、短距离、低成本和低数据速率等特点，可以自主实现星型、网状和簇状的 3 种拓扑结构。节点使用 64 位 IEEE 地址，整个网络可以容纳多达 65536 个节点。为此系统采用了 ZigBee 组网技术设计了监测节点，避免了大量的繁琐布线^[8]。

但由于矿井下环境复杂，巷道狭长，为了将矿井内各角落的粉尘浓度信息准确和实时地传输到数据监控中心，单纯靠无线传输是不切合实际的，一旦某个节点出现问题，会导致整个系统的网络中断，为此引入了数据汇聚基站与监控中心的有线网络，并建立了三级管理机制，保证了数据传输的可靠性。

2.2 系统总体结构

分布式矿井粉尘浓度在线监控系统主要由粉尘监测节点、风机控制器、数据汇聚基站、井上监控中心和传输网络等组成。粉尘监测节点采用星型拓扑结构组网。系统总体结构架构图如图 2 所示。

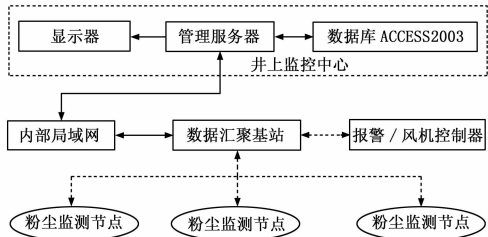


图 2 系统总体架构框图

粉尘监测节点按照一定的规则部署在矿井巷道内，利用设计的电荷感应粉尘传感器采集周围环境中的粉尘浓度，并通过 ZigBee 网络发送到上一级其所属的数据汇聚基站，数据汇聚基站进行初步的数据处理，并判断该区域的粉尘浓度情况，如果浓度超出了预设的允许范围，会自动控制该区域内的风机加大排风量，直到浓度处于允许范围，如果通过长时间排风无法降低粉尘浓度，基站会自动向报警器发出报警信号；数据汇聚基站与监控中心采用 C/S 架构设计，都接入到同一个局域网中，数据汇聚基站作为客户端定时将采集到该区域的粉尘浓度、节点 ID、时间和工作状态等信息打包，通过与监控中心服务器建立的 TCP/IP 网络连接，将数据上传；监控中心的服务器上运行着专业设计的管理软件，接收、处理、显示和分析统计从各基站发上来的数据，并存储在数据库 ACCESS2003 中作为历史备份，便于日后查询，系统实现了对矿井内部各区域的粉尘浓度的在线监测^[9]。

3 节点硬件结构

系统中所用粉尘监测节点和数据汇聚基站的硬件节点采用同一平台开发，只要添加相关的模块和软件即可实现对应的功能。系统硬件平台主要由嵌入式处理器 LPC2148、粉尘传感器、放大调理电路 ICA102C、ZigBee 通信 CC2420、网络控制器 W5100、FLASH 存储器 K9K2G8U0M、矿井风机控制器和报警单元等组成。系统节点硬件平台结构如图 3 所示。

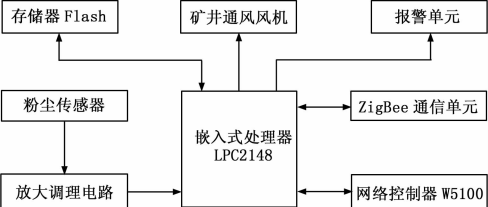


图 3 系统节点硬件平台结构

设计的粉尘浓度传感器接触到周围环境中的粉尘后，输出微弱的电流信号，经过放大调理电路输出 0~3 V 的电压信号，给嵌入式处理器 LPC2148 的 ADC 接口进行模数转化，并根据预先存入的公式 (2) 进行计算，得到采集到的粉尘浓度值 C ，将数据打包后通过 ZigBee 通信单元 CC2420 发送到数据汇聚基站；数据汇聚基站接受来自各节点发来的粉尘浓度，经过均值运算处理后，得到该区域的粉尘浓度信息，在与预设的安全值进行比较，如果

超出了安全范围,则控制矿井通风风机加大排风量,若长时间无法降低粉尘浓度,则启动报警装置;同时将相关信息打包,通过网络控制器 W5100 发送至监控中心服务器。

3.1 电荷放大电路

当粉尘经过电极时会在电极上感应出等量异种电荷,由于粉尘上所带电荷量非常少,感应电荷能量极小,必须对感应电荷进行放大后才能被检测,同时还需要建立感应电荷与粉尘浓度之间的关系。传统电荷放大器主要有电荷放大级、适调级和滤波电路构成,但由于感应电荷极小,难以精确稳定放大,传统的电荷放大器对输入信号的频率要求不能太高,否则输出会产生信号堆积,后续电路设计比较复杂。为了减小电荷放大电路的设计难度,选取了精密电荷放大器模块 ICA102C,它具有精度高、噪声小、温度稳定性和抗干扰能力强的特点。

ICA102C 电荷放大器模块包括一个低噪声、高输入阻抗的电荷,变换电路和一个可调增益的精密输出放大电路。模块的电荷放大倍率为:

$$A_m = A_c \times A_r \tag{3}$$

式中, A_c 为电荷放大比率, $A_c = 0.1 \text{ mV/pC}$, A_r 为输出放大器比率,范围为 1~101,当外部增益调节端开路时, $A_r = 101$ 。ICA102C 电荷放大器的输出信号范围为 0~3 V,完全可满足检测要求。

3.2 通信单元

嵌入式处理器 LPC2148 与 ZigBee 通信单元 CC2420 的 SPI 连接,通过发送指令进行工作参数配置和数据收发,实现了与数据汇聚基站的通信; W5100 是一款功能强大的片网络接口芯片,内部集成了 10/100M 的以太网控制器,全硬件的 TCP/IP 协议栈,且有完备的 API 接口函数,提供了直接并行、间接并行和 SPI 总线 3 种接口方式。由于 ZigBee 通信模块 CC2420 占用了 SPI,嵌入式处理器 LPC2148 与 W5100 采用并行总线连接,进行指令的收发和数据交互。

4 监控中心管理软件设计

监控中心管理软件采用 VC++6.0 作为开发工具编写,工作在 Windows 环境下,它是一个集数据接收、处理、存储、显示、网络、数据库、查询和分析统计预测于一体的多功能软件,通过调用 Socket 函数与矿井内数据汇聚基站建立 TCP/IP 网络连接,接收各基站定时发送来的粉尘浓度和设备工作状态信息;工作在服务器上的管理软件对这些数据处理,并显示在屏幕上,同时将数据存储在数据库 ACCESS2003 中,以备在需要的时候进行查询和分析统计预测,为采矿作业和排风控制提供数据支持^[10]。监控中心管理软件结构与功能如图 4 所示。

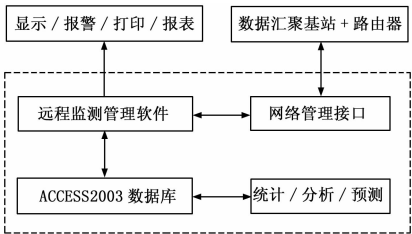


图 4 监控中心管理软件结构与功能框图

数据监控中心服务器始终保持与数据汇聚基站保持 TCP/IP 网络连接,负责接收来自各数据汇聚基站的数据包,经过

解析处理后,根据设置显示在显示器上,可通过调用 Teechart 控件对某区域进行浓度—时间曲线图的实时绘制;通过对历史数据的统计分析,还可以建立粉尘浓度变化趋势模型,便于提前做好排风作业;一旦发现某区域的粉尘浓度超过预设的安全范围,并无法通过自动排风解决时,会在监控中心的显示器上发出报警信号,提醒监控中心的值班人员察看显示画面,并通知相应的管理人员进行处理。

5 实验结果与分析

为了验证所设计的电荷感应粉尘传感器的测量精度和系统的工作性能,在实验室模拟了测试环境,并搭建了硬件测试平台。

采用天平称重法对粉尘传感器进行标定。监测节点将采集到的粉尘浓度发送至数据汇聚基站,再转发到监控中服务器的管理软件上进行显示和记录。天平称重法测得粉尘浓度为 C_s ,电荷感应法测量的粉尘浓度为 C_Q ,测试数据如下表 1 所示。

表 1 粉尘浓度测试数据

$C_s(\text{mg}/\text{m}^3)$	AD 转换值	$C_Q(\text{mg}/\text{m}^3)$	误差(%)
0.0	18.0	0	0
10.1	125.0	10.8	4.85
49.5	712.0	51.9	2.74
83.9	1 104.0	86.2	1.21
116.1	1 247.0	117.5	2.02
153.1	1 910.0	156.2	2.51
302.8	3 681.0	310.4	1.52
571.6	6 657.0	580.3	3.08
803.2	9 575.0	827.9	4.65
1 000.7	12 536.0	1 047.2	6.93

由表 1 中数据可以看出,电荷感应传感器测量粉尘浓度具有比较高的测量精度,以天平称重法作为标准浓度,可以计算出电荷感应法粉尘浓度浓度的测量平均误差为 2.95%。将表 1 的 AD 转换值与测量浓度 C_Q 进行数据拟合,如图 5 所示。

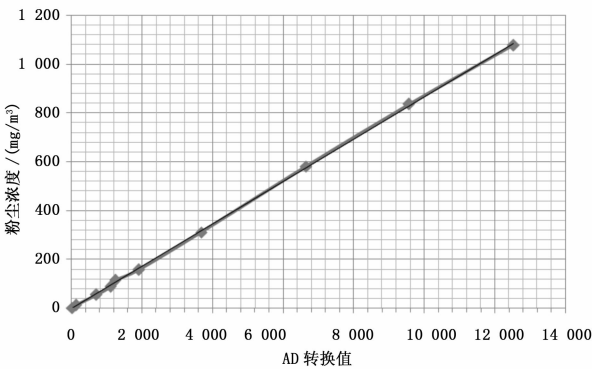


图 5 AD 转换值与测量浓度 C_Q 拟合曲线

通过图 5 的拟合曲线可以看出,电荷感应传感器与粉尘浓度具有良好的线性关系,也说明了测量管段内 2.5 m/s 风速条件完全满足设计要求。通过在监控中心管理软件的表现可知,整个系统工作良好,实时性高,能够实现矿井粉尘浓度的在线测量。

(下转第 2089 页)

表 1 模糊控制规则如

$U \begin{matrix} \diagup \\ EC \end{matrix} \begin{matrix} \diagdown \\ E \end{matrix}$	NM	NS	ZO	PS	PM
NM	PB	PB	NS	NS	NS
NS	PB	PB	NS	NS	NS
ZO	PS	PS	ZO	NS	NS
PS	NS	NS	PS	PS	PS
PM	NS	NS	PS	PS	PS

2.4 模糊判决

确定了模糊控制规则 R , 模糊控制器输入语言变量论域上的模糊子集 E 和 EC 后, 可根据合成规则求出输出语言变量论域上的模糊集合 U , 即:

$$U = (E \times EC) \circ R$$

这个模糊量 U 通过加权平均法清晰化运算后, 转化为精确量, 成为实际的控制量。在以上工作基础上, 可以建立一个根据电压差、电压差变化率和控制规则建立的查询表, 获得应加到执行机构上的实际精确控制量, 即对应的 Cuk 变换器电路开关 $Q3$ 导通角的占空比值, 从而控制蓄电池充电电流值。

3 实验结果分析

试验分别采用模糊控制充电模式和三段式充电模式对 12 V/9 Ah 的蓄电池充电作比较, 两种模式下的充电电流动态变化曲线如下图 5。

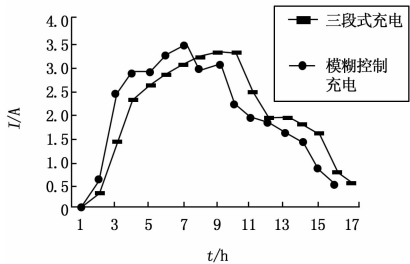


图 5 两种模式充电电流动态变化曲线

(上接第 2086 页)

6 结束语

基于电荷感应原理设计了电荷感应粉尘浓度传感器, 设定测量管段内为 2.5 m/s 的恒定风速, 保证了传感器的输出与粉尘浓度具有良好的线性关系。利用三级管理结构设计了分布式粉尘浓度在线监控系统, 采用 ZigBee 技术设计的低功耗嵌入式监测节点工作稳定, 并借助数据汇聚基站接入井下局域网, 实现了数据的准确可靠传输。实验结果表明, 设计的电荷感应粉尘浓度传感器的测量精度高, 平均误差仅为 2.95%, 实现了煤矿井下粉尘浓度的在线监测和风机的排风控制, 大大提高了井下粉尘环境的自动调节能力。

参考文献:

[1] 黄成玉, 赵立永, 张全柱, 等. 煤矿粉尘浓度传感器及检测系统的研究 [J]. 煤矿安全, 2011, 42 (5): 24-27.
[2] 武 帅, 杨胜强, 王建波, 等. 高压气流射喷嘴雾降尘除尘技术应用研究 [J]. 煤炭工程, 2012, (4): 64-66.

(1) 三段式充电模式下充电时间将近为 17 小时, 模糊控制模式下充电时间将近为 15.5 小时, 充电时间缩短了。

(2) 蓄电池最大充电电流为 4 A, 考虑安全问题, 三段式充电模式下最大电流设定为 3 A, 而模糊控制充电模式下, 最大充电电流可接近 3.5 A, 表明模糊控制模式下, 具有自动识别最大充电电流之能力。

4 结论

通过对模糊控制模式下蓄电池充电的测试试验, 以及与三段式充电模式的比较, 说明模糊控制充电模式具有更好的充电功能, 能够更好地接近蓄电池的充电特性, 提高充电速度, 对提高充电效果, 延长蓄电池的使用寿命, 具有重要的实际意义。

参考文献:

[1] 高玉峰, 王治国. 基于 Mega 1 6 的蓄电池充放电控制器 [J]. 通信电源技术, 2008, 25 (6): 56-59.
[2] 张为民, 李晓武, 雷 霆. 太阳电池一铅酸蓄电池充电控制器的研究 [J]. 电源技术, 2004, 18 (1): 43-46.
[3] 田永盛. 一种单片机控制的铅酸蓄电池充电电源 [J]. 电子设计工程, 2011, 19 (3): 48-51.
[4] 周海峰, 林忠华. 光伏一风力发电系统中蓄电池的控制与仿真 [J]. 电源学报, 2011, (3): 66-70.
[5] 周立峰, 黄辉先. 基于模糊 PI 控制的充放电控制器的设计 [J]. 机械与电子, 2011, (8): 43-46.
[6] 彭晓光, 李 旸, 王广生. 蓄电池快速节能充电系统的设计 [J]. 电源技术, 2010, (12): 1276-1279.
[7] 李向昭, 朱江南. 基于 T M S 3 2 0 F 2 8 0 3 5 蓄电池充放装置 [J]. 电测与仪表, 2011, (11): 68-70.
[8] 何兆柱, 朱 元. 电池检测数据采集与控制系统的设计 [J]. 电池工业, 2010, (6): 372-375.
[9] 李细荣, 胡永彪. 视觉导航铣刨机的模糊控制器设计与仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2010, (10): 2716-2719.

[3] 赵恩彪, 李德文, 王自亮, 等. 电荷法测量粉尘密度的试验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27 (2): 269-272.
[4] 李宗伦, 赵修良, 彭丽婧, 等. β 射线粉尘测量仪在煤矿粉尘浓度监测中的应用 [J]. 中国矿业, 2010, 19 (3): 107-110.
[5] 李 霜, 袁辉建, 阳 明, 等. 双光谱电力设备在线监测装置的实现 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (12): 2899-2901.
[6] 陆敏恂, 朱列铭, 周爱国. 超声波流量计中相关时差法的应用 [J]. 仪表技术与传感器, 2011, (12): 105-107.
[7] 贾云飞, 张 涛, 张清鹏. 涡街流量计与孔板流量计压力损失的比较研究 [J]. 计量学报, 2008, 29 (2): 134-137.
[8] 谭 飞, 雷凯丽. 基于 LPC1343 的煤矿粉尘浓度监测仪设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2012, (2): 56-57.
[9] 赵立永, 张全柱, 黄成玉. 基于 CAN 总线的新型煤矿粉尘浓度检测系统的研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8 (3): 76-79.
[10] 周 曦, 何振宇, 单鸣雷, 等. 输配电开闭所环境及安全综合监控系统的设计 [J]. 计算机工程与设计, 2013, 34 (7): 2609-2613.