

基于 TDLAS 的矿用激光一氧化碳检测系统的设计

张立群^{1,2,3}

- (1. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013;
2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013;
3. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013)

摘要: 目前煤矿普遍采用基于电化学测量原理的一氧化碳检测装置, 为解决其在实际应用中存在的测量精度低、标校周期短、探头寿命短、易受背景气体干扰产生误报警等问题, 文章设计了一种基于 TDLAS 的矿用激光一氧化碳检测系统; 该系统采用更低功耗的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 替代 DFB 激光器, 以 ARM 和 FPGA 为核心, 实现了一氧化碳的实时准确测量; 测试结果表明, 该传感器的基本误差不大于测量值的 2%, 响应时间小于 15 s, 可靠性高, 能有效解决电化学原理检测装置现存的问题, 对提升煤矿安全监测的可靠性, 减轻设备运维的工作量具有重要的现实意义。

关键词: 可调谐半导体激光吸收光谱; 激光一氧化碳; 垂直腔面发射激光器; 最小二乘法拟合

Design of Laser Carbon Monoxide Detection System for Mine Based on TDLAS

ZHANG Liqun^{1,2,3}

- (1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
2. Engineering Research Center of Coal Mine Emergency Hedge Technology and Equipment, Beijing 100013, China;
3. Research Center of Mine Safety Engineering and Technology, Beijing 100013, China)

Abstract: At present, carbon monoxide sensors based on electrochemical measurement principle are widely used in coal mines. In order to solve the problems of low measurement accuracy, short calibration cycle, short probe life and false alarm caused by background gas interference, the paper designed a mine laser carbon monoxide sensor based on TDLAS. The sensor uses a lower power consumption VCSEL laser to replace the DFB laser. Meanwhile, it uses ARM and FPGA as the core, and realizes the real-time and accurate measurement of carbon monoxide. The test results show that the fundamental error of the sensor is no more than 2% of the measured value, the response time is less than 15s, and the reliability is high. It can effectively solve the problems existing in the sensor of electrochemical measurement principle. And it is of great significance to improve the reliability of coal mine safety monitoring and reduce the workload of sensor operation and maintenance.

Keywords: TDLAS; laser carbon monoxide; VCSEL laser; least square fitting

0 引言

一氧化碳是煤层自燃的标志性气体, 是火灾的主要指标, 同时也是导致井下人员中毒死亡的重要因素。因此, 对一氧化碳的实时准确监测与定期标校是煤矿安全的中中之重。目前煤矿普遍采用基于电化学测量原理的一氧化碳检测装置, 此原理在实际应用中存在着如下问题: 1) 测量精度低, 易受电磁干扰以及环境中的水汽、粉尘、氢气、乙烯等背景气的影响, 造成其测量不准确、误报警现象时常发生; 2) 标校周期短, 一般不超过 15 天; 3) 探头寿命短, 因接触式的测量方式, 通常 1~2 年探头就需更换一次。为此, 孙继平教授在参考文献 [1] 煤矿的新技术中, 对基于

可调谐半导体激光吸收光谱 (TDLAS) 技术的一氧化碳测量方法给出了指导性建议。TDLAS 技术是目前一种先进的气体测量技术, 利用可调谐半导体激光器的窄线宽和波长随注入电流可调节的特性, 通过分析激光被气体的选择吸收程度来计算气体浓度, 具有非接触式测量、测量精度高、响应速度快、环境适应性好等优点^[2], 已逐渐在矿用激光甲烷检测装置上得以应用。但因其整机体积、成本、功耗、测量精度、激光器波长范围等因素, 激光一氧化碳检测装置尚未在煤矿实际应用。

鉴于此, 本文基于 TDLAS 技术, 研究设计了一种激光一氧化碳检测系统, 采用 VCSEL 型垂直腔面发射激光器替

收稿日期: 2021-03-16; 修回日期: 2021-05-10。

作者简介: 张立群(1981-), 男, 辽宁建平人, 大学本科, 工程师, 主要从事煤矿安全工程信息化、自动化、智能矿山的设计、技术支持等方向的研究。

引用格式: 张立群. 基于 TDLAS 的矿用激光一氧化碳检测系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(7): 61-66.

代 DFB 型激光器作为检测光源,有效改善了激光气体检测中的体积与功耗问题^[3],采用 CAN 总线与监控分站进行数字信号通信,实现了一氧化碳的实时可靠测量与数字信号传输。

1 系统总体设计

激光一氧化碳检测系统的总体结构图如图 1 所示。检测系统以 ARM STM32F429 和 FPGA XC6SLX45 为设计核心,采用模块化结构设计,由电源模块、气体检测模块、主控模块、显示模块、通信模块、红外遥控模块、声光报警模块组成。

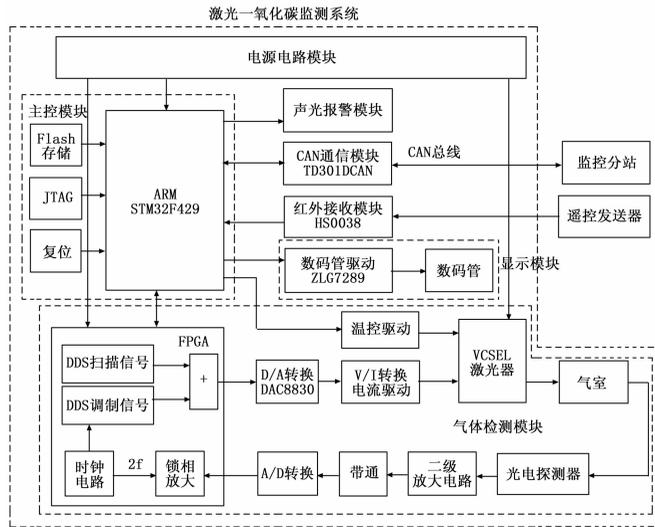


图 1 系统总体结构图

电源模块负责系统的缓启及各等级的电压转换,给系统供电;气体检测模块基于 TDLAS 气体检测原理,负责将一氧化碳气体浓度转换成光强信号并提取光强信号的二次谐波幅值;主控模块根据气体检测模块提取到的光强二次谐波幅值,实时计算一氧化碳气体的浓度;显示模块用于将主控模块计算出的一氧化碳气体浓度值实时的本地显示;通信模块用于将一氧化碳浓度值实时传输给井下监控分站,再由分站上传到地面上位机;红外遥控模块接收遥控器的操作指令,对检测系统进行设置、标校;声光报警模块用于当一氧化碳浓度超限时,同时发出声、光两种报警信号。

2 系统检测原理

本文设计的激光一氧化碳检测系统基于 TDLAS 的检测原理实现对一氧化碳气体浓度的检测。每种气体都会吸收其特定波长的光,TDLAS 气体检测原理就是基于气体在红外波段的的选择吸收性和 Beer-Lambert 定律^[4]。Beer-Lambert 定律如公式 (1),给出了光的吸收强弱与吸光物质之间的浓度关系。

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\alpha(\nu)CL] \quad (1)$$

式中, $I(\nu)$ 为光穿过被测气体后的出射光强度, $I_0(\nu)$ 为被测气体浓度为 0 时的入射光强度, $\alpha(\nu)$ 为被测气体分子

吸收截面, C 为被测气体浓度, L 是光程。

TDLAS 气体测量原理示意图 2 所示,利用半导体激光器输出波长随电流和温度可调节的特性,在低频锯齿波调谐信号的基础上叠加高频正弦波调制信号,驱动半导体激光器在一氧化碳的吸收峰附近扫描^[5],以消除激光器自身及周围环境带来的低频噪声干扰^[6],提升气体检测精度。激光经过气室被一氧化碳吸收后,光强发生衰减,经光电探测器将接收的光信号转换为电信号后,输出到锁相放大器解调,提取谐波信号。依据 Beer-Lambert 定律,对式 (1) 进行傅里叶展开后,可以得到光强的二次谐波幅值与待测气体浓度成正比关系^[7-10],因此可将气体浓度计算简化为式 (2):

$$C = KV_{2f} \quad (2)$$

式中, C 为气体浓度, K 为比例系数, V_{2f} 为二次谐波幅值。

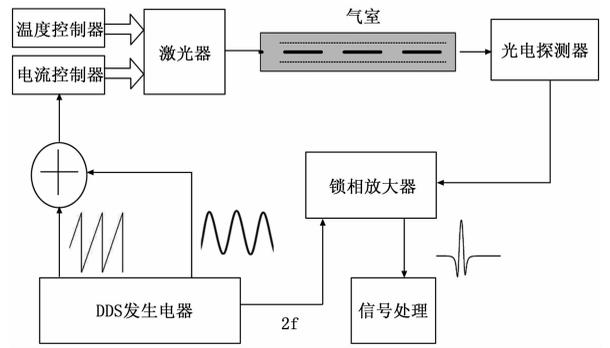


图 2 TDLAS 气体测量原理示意图

因此,可以通过测量二次谐波幅值来得到气体的浓度值。为进一步滤除随机噪声和系统噪声,多次采集标准气体浓度下的二次谐波幅值,将幅值与对应的标准气体浓度做最小二乘法直线拟合^[11],得到拟合度、正比例系数及拟合方程。取一氧化碳在 50 ppm、100 ppm、200 ppm、350 ppm、500 ppm、600 ppm、750 ppm、900 ppm、1 000 ppm 标准气体浓度下的二次谐波幅值 20 次,取平均值,拟合直线如图 3 所示。

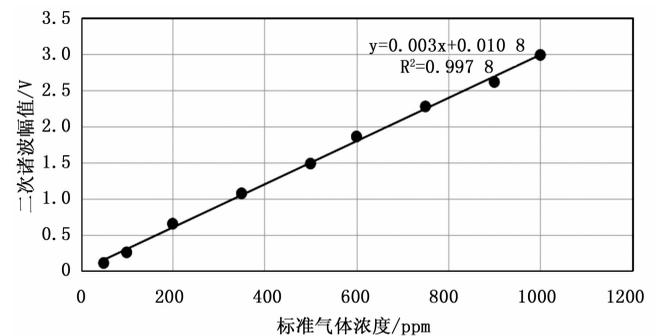


图 3 二次谐波幅值与气体浓度拟合直线

图 3 表明二次谐波幅值信号与气体浓度有良好的线性关系。之后通过采集气体二次谐波幅值再根据拟合方程,即可计算出待测的一氧化碳气体浓度值^[12]。

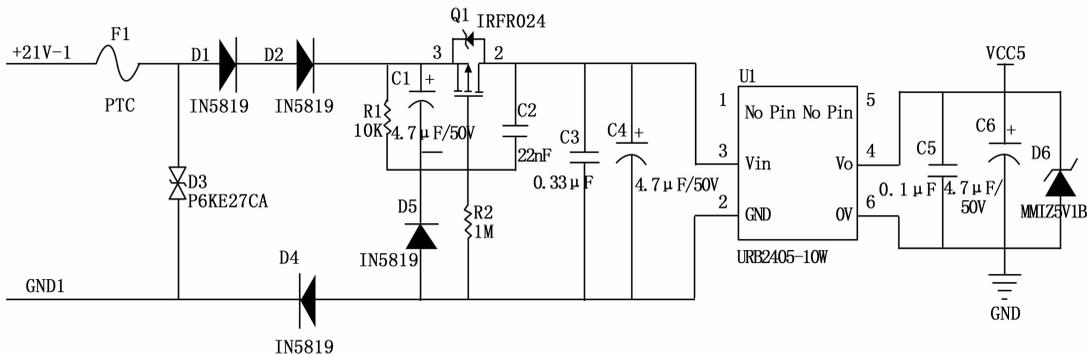


图 4 电源缓启动电路图

3 系统硬件设计

3.1 电源模块设计

电源模块由系统的缓启动电路及各等级的电压转换电路两部分组成。矿用气体检测装置需满足长距离传输和低功耗需求，采用图 4 的电源缓启动电路，避免了系统上电瞬间产生的冲击电流对系统造成频繁重启或不工作的问题，同时保障了 VCSEL 型半导体激光器的安全与稳定。

电源接入瞬间对电容 C1 充电，随着 C1 逐渐充满，P-MOS 管 Q1 逐渐导通，掉电时 C1、R1 组成放电回路，减少震荡，实现电源缓启动。通过 DC-DC 电源转换芯片 URB2405 将外部 22 V 输入电压转换成 5 V，为气体检测模块供电，再经 TPS76933 将 5 V 转换成 3.3 V 电压，给其他模块供电。

3.2 气体检测模块设计

气体检测模块基于 TDLAS 气体测量原理，完成对一氧化碳气体浓度的光强信号转换、光强信号的二次谐波幅值提取与主控模块的通信。气体检测模块以 FPGA 为控制核心，由激光器驱动电路、VCSEL 激光器、气室、光电探测器、信号处理电路组成。

激光器采用德国 VERTILAS 公司的中心波长 2 334 nm 的 VCSEL 激光器，相比于目前普遍使用的 DFB 激光器，VCSEL 结构的激光器具有体积小、发热量小、光谱稳定性高、价格低廉等优势，可有效改善激光传感器在井下使用时的体积、功耗与成本等问题^[13]。气室采用多次反射方式增加吸收光程，提升探测灵敏度。

FPGA 完成调制激光驱动波形的产生以及二次谐波幅值信号的数字锁相解调与提取^[14]。利用 FPGA 内部集成的数字波形发生器功能模块，产生低频锯齿波叠加高频正弦波的激光器驱动信号，经过 D/A 芯片 DAC8830 转换成模拟量后，通过激光电流驱动电路调节激光器的供电电流，从而调节激光器的出射波长，电流驱动电路如图 5 所示。

V_r 为 FPGA 产生的激光器输入调谐电压，驱动电流 I_o 。随输入的调谐电压 V_r 线性变化，实现对激光器的电流驱动控制。电路由运放和场效应管等组成，选用高稳定性、低噪声低失调电压、小温漂的高速精密运放 OPA227 作电压跟随。R20 为限流电阻，R22 为低温漂电流采样电阻，流经

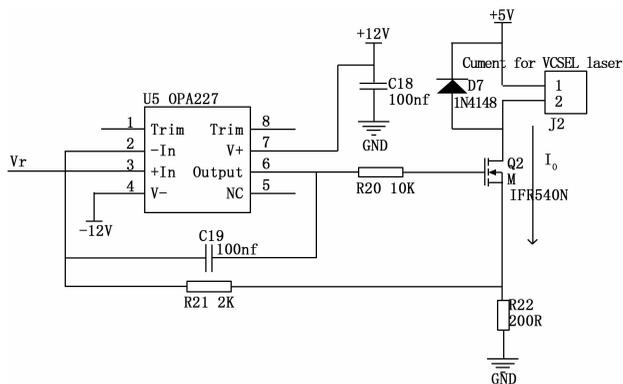


图 5 激光器电流驱动电路图

R22 的电流即驱动电流 I_o ，R21 和 C19 起滤波作用，在输入电压和负载瞬间变化时保证电路的稳定，D7 防止浪涌击穿激光器。

激光器在驱动电流的作用下产生特定波长的激光光束，激光光束穿过气室被一氧化碳吸收后，由光电探测器将衰减的光信号转换成电信号。光电探测器的输出为毫安电流信号，比较微弱^[15]，采用二级放大电路对微弱的电流信号处理，第一级采用 AD829 跨阻放大电路完成电流电压转化，第二级实现电压信号放大，避免了使用单级放大电路引入的噪声与失真^[16]。经信号放大处理后送入 FPGA 内部的数字锁相放大器解调提取二次谐波幅值，提取出的幅值传给主控模块做进一步的浓度计算、实时显示与数字化传输。

3.3 主控模块设计

主控模块以 ARM STM32F429 为核心，由复位电路、JTAG 电路、Flash 存储电路组成，是完成系统各功能的处理核心。主控模块与气体检测模块采用 SPI 通信，根据其提取的光强二次谐波幅值，结合拟合方程实时计算一氧化碳气体的浓度值，并根据逻辑判断驱动显示模块、通信模块、声光报警模块、红外遥控模块，完成一氧化碳气体浓度的实时计算、显示、数据传输、参数配置、声光报警等功能。

3.4 显示模块设计

显示模块用于将主控模块计算出的一氧化碳气体浓度值实时本地显示，由共阴数码管、数码管驱动芯片 ZLG7289 组成，如图 6 所示。ZLG7289 与主控模块采用 SPI 通信，其内

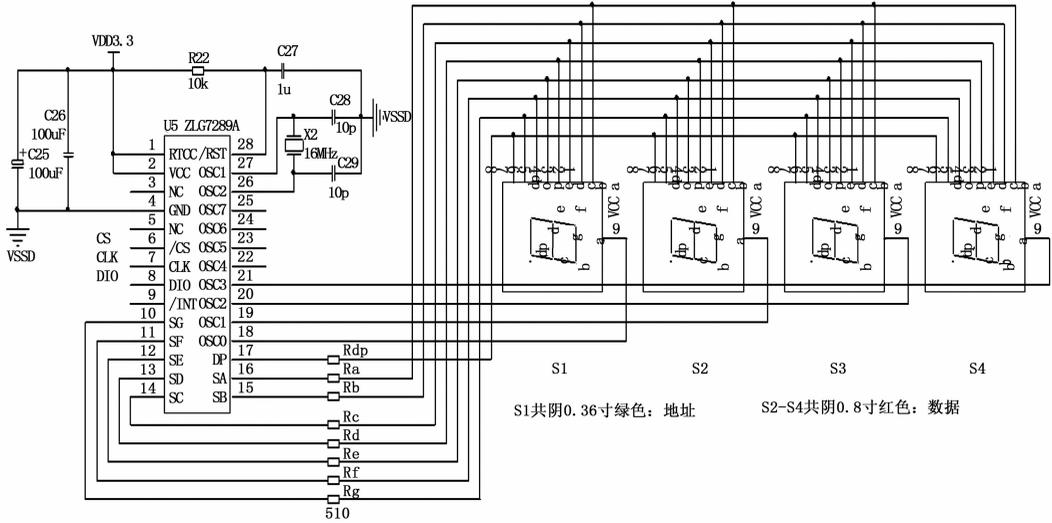


图 6 数码管显示电路

部含有译码器并具有多种控制指令，控制数码管的段选与位选，实现数码管的实时显示、闪烁与消隐等功能^[17]。

3.5 通信模块设计

系统采用 CAN 总线实现与监控分站的数字信号通信，CAN 总线的多主并发及 CRC 校验机制，实现了传感器在传输过程中的实时性及可靠性。CAN 总线选用扩展帧格式，将传感器类型、故障类型等信息填入帧 ID 里主动上报，实现了系统自识别、故障自诊断等智能传输功能。通信模块电路如图 7 所示，选用集总线隔离与 ESD 保护于一体的金升阳 CAN 收发模块 TD301DCAN，实现 CAN 信号驱动电平的转换，结合滤波模块 L3、双向瞬态抑制二极管 D10 等保护器件，达到了浪涌（冲击）抗扰度 3 级 A，脉冲群抗扰度 4 级 A 标准。

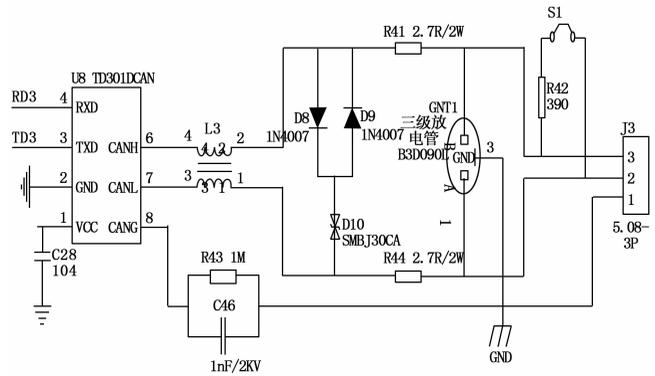


图 7 CAN 总线通信电路图

3.6 红外遥控模块设计

红外遥控模块电路由红外接收头 HS0038B 和红外解码芯片 BC7210A 组成，完成对红外遥控指令的接收，对系统的参数设置、标校，电路图如图 8 所示。红外接收头 HS0038B 易受电源杂波等干扰，在其电源脚 VS 接入 R25 和 C17 作电源滤波处理，输出脚 OUT 接入解码芯片 BC7210A 的红外输入

脚 IR，BC7210A 采用 NEC 模式，完成解码后通过 SPI 与主控模块通信。

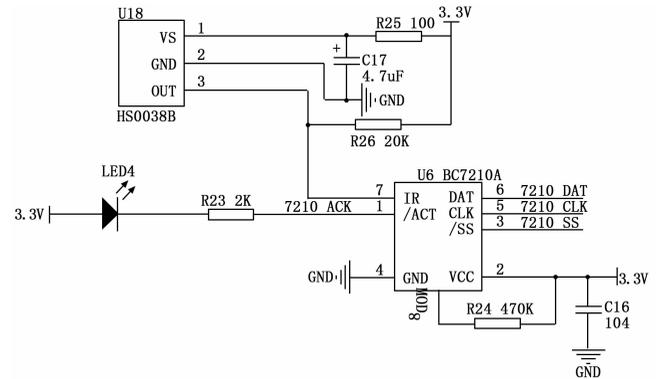


图 8 红外遥控电路

3.7 声光报警模块设计

声光报警电路如图 9 所示，由主控模块根据一氧化碳的数值判断是否启动声光报警电路。一氧化碳超限时，主控模块 I/O 口 Buzzer 和 LED 输出低电平，T1、T2 三级管 S9012 导通，蜂鸣器响，LED 灯亮，实现系统声光报警功能。

4 系统软件设计

系统的软件设计包括 FPGA 和 ARM 的设计。利用 FPGA 的可编程性及内部集成的波形发生器、数字锁相放大器功能模块，完成 DDS 驱动信号的产生及二次谐波信号提取。ARM 采用 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 实时系统，按系统的功能要求划分各任务及优先级，通过任务调度函数来调度各任务，实现气体浓度的实时计算、显示、通信、声光报警与遥控配置。系统软件流程如图 10 所示。

系统上电对 ARM 和 FPGA 的相关外设以及初始的设备地址、报警值等参数初始化并进行故障自诊断。有故障时，系统显示故障类型码、进行声光报警并主动上报到监

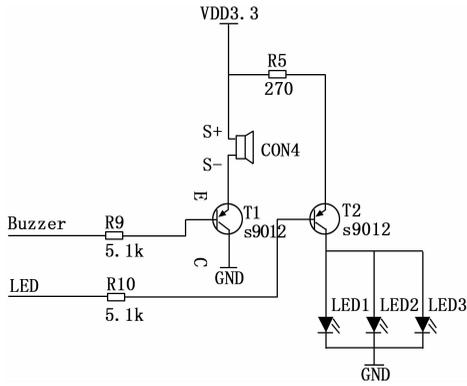


图 9 声光报警电路

时，执行 CAN 总线的实时通信任务。

5 测试结果与分析

系统的量程为 0~1 000 ppm，对激光一氧化碳检测系统和电化学一氧化碳检测系统分别进行气体浓度基本误差和响应时间的对比实验，来验证基于 TDLAS 的激光一氧化碳检测系统的测量优势。

采用清洁空气和 500 ppm 标准气样分别对激光和电化学检测系统进行标定，校准后进行基本误差实验。按照检测标准分别向两种检测系统依次通入 350 ppm、500 ppm、750 ppm 标准气样各 3 min，记录两种检测系统的显示值，重复测定 3 次取平均值，表 1 为电化学一氧化碳误差测试数据，表 2 为激光一氧化碳误差测试数据。

表 1 电化学一氧化碳测试误差

标准气浓度/ppm	测量浓度/ppm	相对误差/%
0	0	0
350	361	3.14
500	515	3.0
750	771	2.8

表 2 激光一氧化碳测试误差

标准气浓度/ppm	测量浓度/ppm	相对误差/%
0	0	0
350	356	1.71
500	494	1.20
750	758	1.06

从表中可以看出激光一氧化碳检测系统在低浓时误差相对较大，但整体精度表现明显优于电化学一氧化碳检测系统，测量精度较高。

对两种系统分别进行响应时间实验，按 200 mL/min 流量通入清洁空气，待系统零点稳定后，分别向两种检测系统通入 500 ppm 的标准气样，并开始记录传感器的显示值到 450 ppm 时所需的时间，重复测定 3 次取平均值，可得电化学一氧化碳的响应时间不大于 35 s，激光一氧化碳的响应时间不大于 15 s。

通过对 TDLAS 测量原理及上述实验分析可知，与基于电化学的一氧化碳检测系统相比，激光一氧化碳检测系统因采用全光学结构的激光器，具有本质安全的特性，使之不易受到电磁辐射的干扰、不产生火花，其高分辨率的光谱技术和非接触式测量方式，可有效降低粉尘或背景气体的干扰，具有更高的精度和更快的响应速度。

6 结束语

本文分析了 TDLAS 技术实现气体高精检测的原理，以 ARM 和 FPGA 为核心，设计了一种基于 TDLAS 技术的激光一氧化碳检测系统。采用 VCSEL 激光器减小了整机的体积与功耗。测试结果表明，该系统基本误差不大于测量值的 2%，响应时间不大于 15 s，与传统的电化学检测系统相

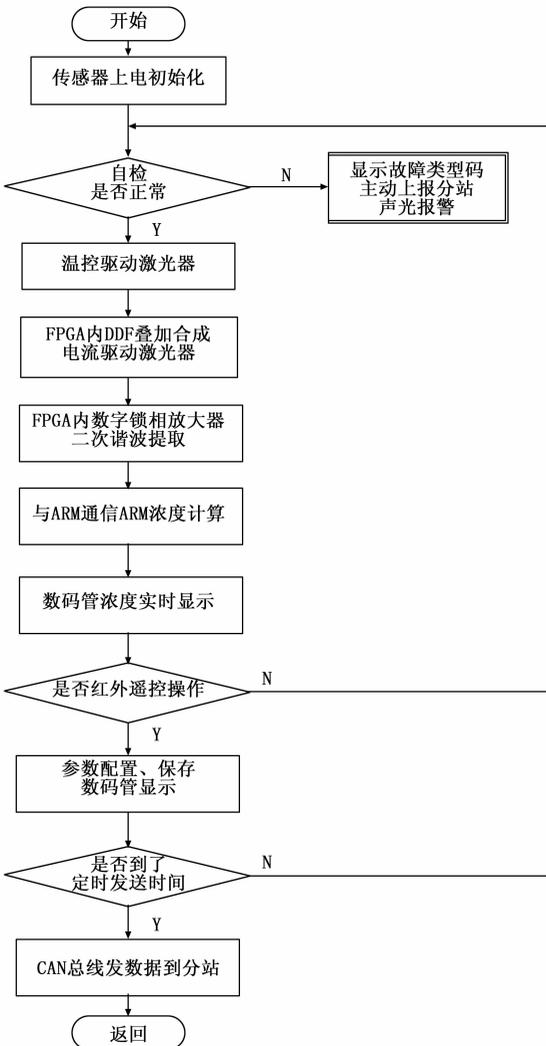


图 10 系统软件流程图

控分站。自检正常时，通过 FPGA 片内的累加器、波形数据表、数字锁相放大器等资源完成激光器的驱动信号调制及解调^[18]。ARM 根据 FPGA 传送过来的二次谐波值，依据拟合方程作气体浓度的实时计算与数码管显示。当有红外遥控中断时，执行相应的参数配置任务，当定时中断到

比, 基于 TDLAS 技术的一氧化碳检测系统具有单一选择性、不受背景气干扰; 测量线性好, 精度高、响应快; 标校周期长、使用寿命长等优点^[19], 解决了目前煤矿电化一氧化碳检测系统存在的诸多问题, 实现了二氧化碳的实时在线测量与数字信号传输。TDLAS 气体检测技术在二氧化碳检测系统上的应用, 对提升煤矿安全监测的可靠性, 减轻井下人员对设备运维的工作量具有重要的现实意义与经济价值^[20]。

参考文献:

[1] 孙继平. 煤矿信息化自动化新技术与发展 [J]. 煤炭科学技术, 2016 (1): 19-23.

[2] 高敏杰, 卜雄洙, 张又戈. 基于 FPGA 的可调谐半导体激光器驱动电路设计 [J]. 激光杂志, 2019, 40 (1): 115-119.

[3] 邓磊. 基于 TDLAS 的甲烷实时监测系统研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2019.

[4] 王彪, 鹿洪飞, 李奥奇, 等. TDLAS 技术的 CO 检测系统 VCSEL 激光光源驱动电路设计 [J]. 激光杂志, 2020, 41 (6): 40-43.

[5] 王彪, 鹿洪飞, 李奥奇, 等. 采用 VCSEL 激光光源的 TDLAS 甲烷检测系统的研制 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49 (4): 1-7.

[6] 石锦涛. 基于 TDLAS 技术的高精度有毒有害气体的浓度检测技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

[7] 范松涛, 周燕, 潘教青, 等. 基于 STM32 和 FPGA 的激光甲烷检测系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2012, 31 (10): 116-118.

[8] 张德胜. 基于 TDLAS 的一氧化碳传感器设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用. 2020 (12): 62-65.

[8] 石争浩, 冯亚宁, 付长龙, 等. 基于机器视觉的铸件表面缺陷人工神经网络检测方法 [J]. 重型机械, 2004, 52 (2): 51-54.

[9] 陈海永, 徐森, 刘坤, 等. 基于 Gabor 小波和加权马氏距离的带钢表面缺陷检测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30 (5): 786-793.

[10] GEOFFREY E HINTON, SIMON OSINDERO, TEH Y W. A fast learning algorithm for deep belief nets [J]. Neural computation, 2006, 18 (7): 1527-1554.

[11] CHENG Y, DENG Y G, FENG Y X. Effects of Faster Region-based Convolutional Neural Network on the Detection Efficiency of Rail Defects under Machine Vision [C] //2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, 2020: 1377-1380.

[12] HOU W H, WEI Y, JIN Y, et al. Deep features based on a DCNN model for classifying imbalanced weld flaw types [J]. Measurement. 2019, 131 (1): 482-489.

[13] 王立中. 基于深度学习的带钢表面缺陷检测 [D]. 西安: 西安工程大学, 2018.

[14] ZHANG Z F, WEN G R, CHEN S B. Weld image deep learn-

[9] 董礼. TDLAS 气体检测系统及其集成化研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.

[10] 顾利帅, 裴彦军, 王立娜. TDLAS 一氧化碳检测系统 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41 (5): 134-137.

[11] 董雪莹. 基于 TDLAS 的一氧化碳气体检测技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.

[12] 张保龙. 基于 TDLAS 的 CO 浓度检测系统的研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2019.

[13] 丁武文, 孙利群, 衣路英. 基于可调谐半导体激光器吸收光谱的高灵敏度甲烷浓度遥测技术 [J]. 物理学报, 2017, 66 (10): 1-9.

[14] 崔晨晨. TDLAS 专用数字锁相放大器设计及 CO2 检测研究 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2019.

[15] 王彪, 陈越, 黄硕, 等. 用于单光路 TDLAS 气体检测的激光器降噪驱动系统设计 [J]. 激光杂志, 2019, 40 (7): 10-14.

[16] 李伟, 贾军伟, 柴昊, 等. 基于 TDLAS 的气体检测技术研究 [J]. 宇航计测技术, 2019, 39 (4): 79-84.

[17] 刘杰, 董洋, 古明思, 等. 基于 TDLAS 技术的吸入便携式甲烷探测器研制 [J]. 量子电子学报, 2019, 36 (5): 521-527.

[18] 周言文. 煤矿甲烷/一氧化碳检测仪电学系统的研制 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.

[19] 王彪, 张函嘉, 陈晨, 等. 用于 TDLAS 气体检测的 FP-GA 数控波形驱动系统研制 [J]. 激光杂志, 2019, 40 (9): 48-51.

[20] 周玉琪. 基于 FPGA 的 TDLAS 信号处理系统研究 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2019.

ing-based on-line defects detection using convolutional neural networks for Al alloy in robotic arc welding [J]. Journal of Manufacturing Processes. 2019, 45 (9): 208-216.

[15] 方叶祥, 甘平, 陈俐. 金属表面缺陷检测的改进 YOLOv3 算法研究 [J]. 机械科学与技术, 2020, 39 (9): 1390-1394.

[16] 姜禹尧. 卷积神经网络算法研究 [J]. 文理导航·教育研究与实践, 2018 (8): 166.

[17] 陈超, 齐峰. 卷积神经网络的发展及其在计算机视觉领域中的应用综述 [J]. 计算机科学, 2019, 46 (3): 63-73.

[18] RUAN X R, CHENG T, WEI X. Research on Face Recognition Based on Improved Dropout Algorithm [C] //IEEE Information Technology and Mechatronics Engineering Conference. 2020: 700-703.

[19] 渠慧帆. 基于深度学习的焊缝缺陷自动检测研究与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.

[20] 王理顺, 钟勇, 李振东, 等. 基于深度学习的织物缺陷在线检测算法 [J]. 计算机应用, 2019, 39 (7): 2125-2128.

[21] 来学伟. 自适应学习率算法探究 [J]. 电脑迷, 2018 (29): 207, 222.