

用于 TDLAS 二氧化碳检测系统的光电探测电路设计

戴童欣^{1,3}, 王彪¹, 连厚泉^{1,3}, 黄硕^{1,2}, 程林祥^{1,2}, 俞泳波^{1,3}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学技术大学, 合肥 230026

摘要: 通过精确检测 CO₂ 气体浓度控制 CO₂ 气体排放是治理大气温室效应过程中最重要的部分, 采用 TDLAS 技术构建的 CO₂ 气体检测系统稳定度高、精密性好, 是一种新型的检气方法。设计了一种应用于 TDLAS 型 CO₂ 检测系统的光电转换模块, 用于接收转换气体选频吸收后的激光信号。激光经过 CO₂ 气体选频吸收后被光电二极管接收, 由 TLV3541 转化放大成模拟信号, 采用 ADS8319 对信号进行采集转换为数字信号后, 回传至主控芯片 STM32H750, 为增大数据存储量, 主控器将数据处理后存储至 FLASH 芯片 MX250L6406E, 最后通过串口将数据实时传送至上位机, 在上位机界面实时显示。通过实验验证, 本设计可以精准、稳定地采集信号, 满足 TDLAS 气体检测系统的要求。可以灵活的推广到其他 TDLAS 检测系统。

关键词: CO₂; TDLAS; 光电探测器; STM32H750

中图分类号: TN271.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.14016/j.cnki.jgzz.2021.04.041

Development of Photoelectric Detection Circuit for TDLAS CO₂ Gas Detection System

DAI Tongxin^{1,3}, WANG Biao¹, LIAN Houquan^{1,3}, HUANG Shuo^{1,2},
CHENG Linxiang^{1,2}, YU Yongbo^{1,3}

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: Emission regulation of CO₂ gas, which is the most effective part in the process of addressing atmospheric greenhouse effect through accurate measuring CO₂ concentration. The CO₂ measuring system constructed by TDLAS technology has high stability and great accuracy veracity, and is a rising gas detection method. This paper designs a photoelectric conversion module for TDLAS CO₂ detection system, to obtain laser signal after frequency selection and absorption of converted gas. The laser is received by photodiode after CO₂ absorption, converted from TLV3541 to analog signal, collected and converted into digital signal by ADS8319, then sent back to the main control chip STM32H750. To increase the capacity of information storage, the master stores the data to the FLASH chip MX250L6406E, and finally transmits the data to the host computer through serial port. By experimental verification, this design can accurately and stably collect signals and meet the requirements of TDLAS system. This module can be flexible applied to various TDLAS system.

Key words: CO₂; TDLAS; photodetector;

STM32H750

收稿日期: 2020-12-15

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制项目(No.61727822)

作者简介: 戴童欣(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事嵌入式系统软硬件方面研究。E-mail: mona_dai@163.com

通讯作者: 王彪(1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事嵌入式系统软硬件方面研究。E-mail: wb5996@163.com

[http : //www.laserjournal.cn](http://www.laserjournal.cn)

1 引言

作为煤炭、石油和天然气燃烧的副产物,CO₂ 广泛地来源于汽车尾气、冬季采暖、化工排放。此外,畜牧业也是 CO₂ 排放的元凶之一。畜牧业在全球温室气体排放总量占比持续增加,成为了除能源产业的第二大排放源。由于 CO₂ 等温室气体的大量排放,近年来全球温度的不断上升,造成了冰川融化、海平面上升、极端天气频发等灾害,对人类的生产生活造成了极大的威胁^[1-2]。因此,对 CO₂ 气体各个生产环节的精准、可控排放,对于改善气候变化、遏制全球变暖的趋势具有极为重要的意义。

目前,用于检测 CO₂ 的传统方法主要有化学体积测量法、红外线吸收法和气相色谱法。然而,传统方法操作复杂、检测精度低、设备维护价格高昂,限制了 CO₂ 气体检测仪的普及。随着人们对气体检测仪精度和便携性要求的逐渐提高,现有的 CO₂ 气体检测仪已无法满足大众的需求。自 1970 年,美国麻省理工学院的 Hinkley 等人首先提出了 TDLAS 气体检测技术^[3]以来,TDLAS 技术这一概念作为气体检测领域中的新兴技术,已经成为精密气体检测领域的重要手段。TDLAS 技术使 DFB 或 VCSEL 激光器^[4-7]扫描特定的气体吸收峰,经待测气体选频吸收后,由光电探测器接收,通过对接收到的信号强度进行处理反演,依据比尔朗伯定律反推得到气体浓度信息。TDLAS 技术检测气体精度高、维护成本低、使用寿命长,无接触的测量减小了误差、增加了安全性。

设计一种用于基于 TDLAS 技术的 CO₂ 气体检测系统的光电探测电路,用来接收并转化经 CO₂ 选频吸收后的激光信号^[8]。所设计的光电探测电路采用 STM32H750 作为主控芯片,实现了激光信号的转化、储存和实时上传至上位机。经过实验,验证了该探测电路的有效性,为集成 TDLAS 技术检测 CO₂ 气体浓度系统提供了依据。

2 系统基本设计

系统主要由以下 6 个部分构成:光电二极管、前置放大电路、A/D 采样电路、基于 STM32H750 的主控芯片电路、存储电路以及上位机部分。图 1 为系统的整体框图。

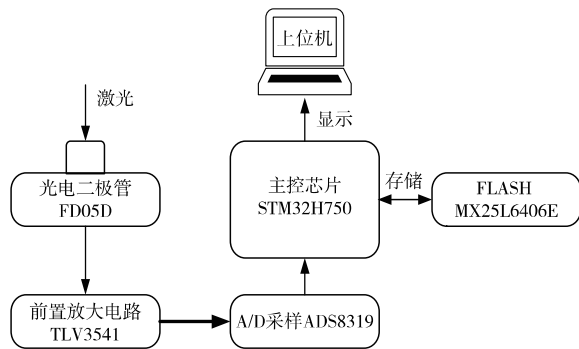


图 1 整体框图

依据 TDLAS 技术,选择 1 581 nm 作为 CO₂ 气体检测的吸收峰,光电探测器选用 Thorlabs 公司的 In-GaAs 光电二极管 FD05D,采用 TLV3541 芯片将微弱电流信号进行前置放大,采用 ADS8319 芯片采集得数字信号后,发送至主控芯片 STM32H750 进行数据处理。数据经处理经主控芯片传输存储至 FLASH 芯片 MX25L6406E,并上传至上位机,设计上位机界面,实时对采集到的数据进行显示。

3 电路设计

3.1 主控器电路

本系统选用意法半导体公司的 32 位嵌入式处理器 STM32H750 作为主控芯片。该芯片基于 M7 内核,提供 128 kB 的 Flash 存储器,工作频率达到 480 MHz,集成 12 位数模转换器、16 位模数转换器,具有多达 35 个通信外设。芯片支持 SPI,且双模式 Quad-SPI 内存接口运行速度最高达到 133 MHz。STM32H750 功耗小、速度快、实时性好,可以精准迅速地控制数据的处理和传输,满足本系统对主控芯片的性能需求。STM32H750 主控电路如图 2 所示。

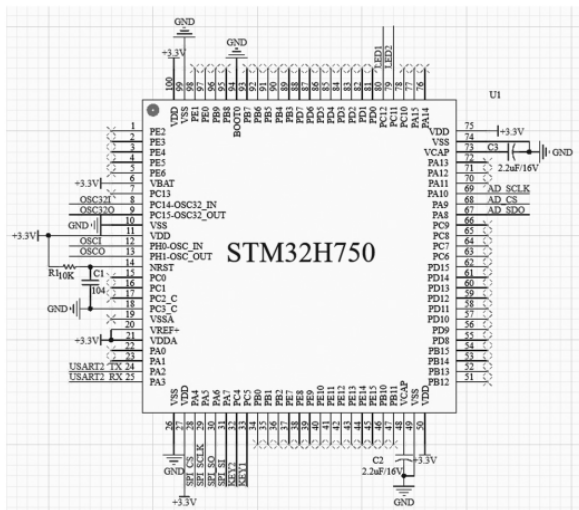


图 2 STM32H750 最小系统电路

在本电路系统中,主控器 STM32H750 驱动 A/D 采样芯片 ADS8319 进行电压信号模数转换,用 IO 口输出片选信号和时钟信号,以达到控制信号采集过程和采集速率的目的。此外 STM32H750 对接收到的数字信号进行处理,最后通过 SPI 传输至 FLASH 芯片 MX250L6406E 中,完成数据的存储,同时主控器通过 RS-485 接口实时上传至上位机进行存储显示。

3.2 光电检测器

3.2.1 光电二极管

光电二极管基于半导体材料的光生伏特效应^[9-11],在光通信系统中将光信号转化成电信号,具有噪声低,精度高等优点。本系统选用 1 581 nm 作为 CO₂ 的气体吸收波长,所以选用 Thorlabs 公司的 In-GaAs 光电二极管 FD05D,该二极管探测波长范围为 900 nm 至 2 300 nm,频谱响应在峰值时达到 1.3 A/W,暗电流最高为 1 μ A,上升下降时间低至 17 ns。

型号为 FD05D 的光电二极管频率响应如图 3 所示。

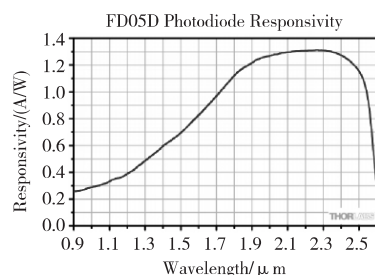


图3 型号为 FD05D 的光电二极管频率响应

FD05D 较好地满足了 CO₂ 检测系统的性能指标,可以精确地转换接收到的激光信号。

3.2.2 前置放大电路

光电探测器广泛应用于光纤通信、光纤传感等领域,根据接收到的激光强度变化来模拟电信号,光电二极管和前置放大电路组成了光电探测器。当工作的光电二极管接收到被 CO₂ 选频吸收后减弱的光信号后,会产生低量级的光电流,并引入部分噪声^[12-13],为实现对有效信号的提取,必须对光电流进行放大和转化,因此,设计前置放大电路将微弱的光电流放大转化成稳定的电信号。

由于光电二极管转化时会引入噪声^[14],前置放大电路中的运放将光电二极管引入的噪声信号一并放大,对系统信噪比产生一定影响^[15]。为解决以上问题,设计一个高增益、低噪声的前置放大电路。由

TLV3541 构成的电流电压转换器如图 4 所示。

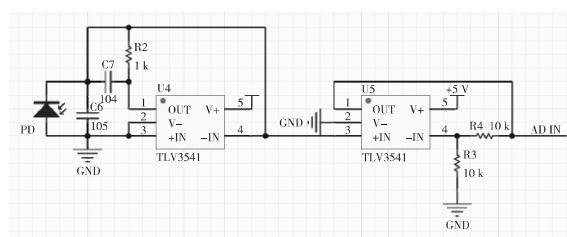


图4 TLV3541 前置放大电路

本设计选用 TLV3541 设计了光电检测的前置放大电路,TLV3541 是专为低功耗系统设计的 CMOS 单通道轨至轨放大器,其仅消耗最大 6.5 mA 的电源电流。具有 200 MHz 的高带宽和 1 MHz 时仅 7.5 nV 的低输入噪声,适用于低电压、高速信号系统。此光电互阻放大器满足本系统对前置放大电路的要求,经实验验证该放大器可以稳定的放大的电压信号,噪声小。

3.3 采样电路

为便于后续信号的处理,需要对光电探测器接收到的模拟电信号,采样转化成数字信号。因此,采用 ADC 进行转换。TI 公司的高速、低功耗、SAR 模数转换芯片 ADS8319 构成了该设计数据采集部分。采样电路如图 5 所示。

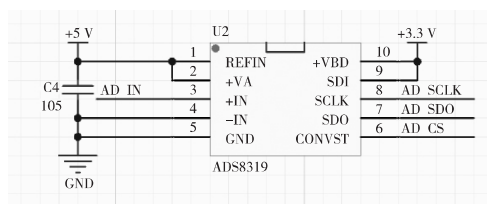


图5 ADS8319 采样电路

ADS8319 是一款工作在 2.25 V 至 5.5 V 电压下的 16 位外部参考 ADC,设备提供伪差分输入,采样率达到 500 kHz,功耗仅为 18 mW。该芯片在 10 kHz 输入时信噪比达到 93.6 dB,总谐波失真仅 -106 dB,噪声弱、失真小,通道空闲时,芯片自动调整功耗节能,功率降至 0.25 mW。数字输出兼容 SPI 的格式,减少了对主控器引脚资源的占用,并易与微处理器、DSP 或 FPGA 集成。ADS8319 采样率高并可以抑制噪声的特点满足了该设计高精度、高速采样的需求。经过实验,由 ADS8319 构成的采样电路可以稳定高速的采集信号。

3.4 存储电路

为增加采集数据的存储量,选择外接读写延迟

低、易于擦写的 FLASH 扩大空间,由于系统掉电后仍可以保存数据,体积小、容量大、安全性好的优点使 FLASH 常被用于构建存储系统。本设计为主控芯片外接了大容量闪存芯片 MX250L6406E。由 MX250L6406E 构成的存储电路如图 6 所示。

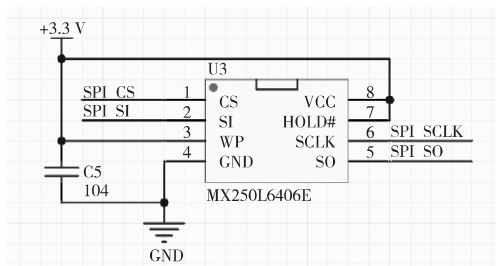


图 6 MX250L6406E 数据存储电路

MX250L6406E 是旺宏电子生产的一款 CMOS 闪存芯片。芯片拥有的 8 M 字节的存储量,要求 2.7 V~3.6 V 的供电范围,支持 SPI 串行传输。在全速传输数据时,功耗较低,且设备在不工作时自动进入待机状态。该芯片具有锁存保护并采用了 Macro-nix 专有的内存单元,可以通过改变状态位控制保护区域的大小,极大地提高了存储系统的安全性和稳定性。数据经主控器处理后通过 SPI 接口传输到该芯片进行存储。经实验证明,该存储电路满足该设计的要求,进行有效安全的存储。

3.5 上位机界面

为直观地显示探测数据,采用跨平台应用开发框架 QT。依据稳定、直观的设计要求,在 QT 平台上编写了一个直观、实时显示采集数据的上位机界面。主控器采用串口将数据上传至上位机,上位机界面运用 C++ 编程绘制了可视化图表。上位机界面如图 7 所示。

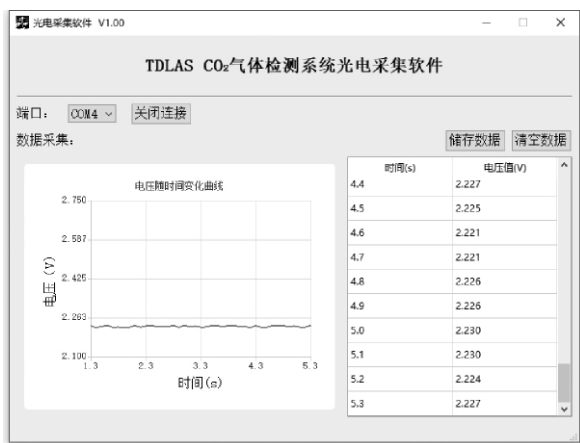


图 7 光电采集软件 V1.00 界面

端口状态栏可以选择端口,显示端口的连接状态,并选择上位机和主控器的开断,数据采集界面分为两个部分:一是采集电压随时间变化数据表;二是采集电压随时间变化数据曲线图。两部分图表都可以直观地体现该设计的检测速度、检测精度和稳定度。此外选择右上角的“储存数据”可以将数据自动生成 CSV 文件,“清空数据”按钮可以将显示区清空,重新检测。

4 实验结果

为对该系统性能进行测试,系统上电后使用激光器发射光强 1 mW、2 mW、3 mW 激光该系统进行实验,上位机界面实时显示电压数据。

光电采集系统接收光强 1 mW 时,上位机曲线如图所示,光电采集稳定性高,误差较小。

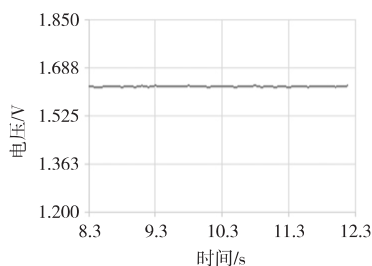


图 8 软件采集光强 1 mW 时电压变化曲线

下表为光电采集系统接收光强 1 mW、2 mW、3 mW 激光时,统计所得电压数据。

表 1 统计数据

输入光强	第 1 组	第 2 组	第 3 组
1 mW	1.578 V	1.593 V	1.621 V
2 mW	3.188 V	3.231 V	3.217 V
3 mW	4.772 V	4.839 V	4.783 V

经由实验数据可得,采样精度可达到 1 mV。该检测系统稳定高效,可以精确地对光电探测器接收到的信号进行转换采样,采样过程稳定,且主控器可以实时速度的将数据通过串口上传至上位机并显示,并存储至外接 FLASH。整个过程检测响应快、传输稳定、数据存储量大,较好地满足了 TDLAS 系统的光电检测模块的需求。

5 结论

基于 TDLAS 技术 CO₂ 气体检测系统的需求,设计了一种实时的高精度光电探测系统,用于接收转换

经气体吸收后的激光。采用光电探测器 FD05D 将激光信号转化成微弱的电流信号,经放大器 TLV3524 互阻放大得到较大的电压信号,为使信号便于主控器处理,采用 ADS8319 进行信号采集后,发送至主控芯片处理,结果通过 SPI 接口存储至 MX250L6406E,并通过串口实时上传至上位机,编写上位机界面进行实时显示。经实验验证,该光电检测系统可以稳定、精准地将光信号转化,并可以快速地上传至上位机,在上位机界面直观地显示,检测精度高,可以适用于 TD-LAS 型其它气体检测系统,普适性较好。

参考文献

- [1] Pogany A, Ott O, Werhahn O, et al. Towards traceability in CO₂ line strength measurements by TDLAS at 2.7 μm [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 130: 147–157.
- [2] 李明星,陈兵,阮俊,等.近海大尺度区域二氧化碳的激光在线探测技术[J].*光学精密工程*, 2020, 28(07): 1424–1432.
- [3] Hinkley E D. High-resolution infrared spectroscopy with a tunable diode laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1970, 16 (9): 351–354.
- [4] 王浩楠,岳小峰,徐海洋,等.电极肖特基接触对有机光敏晶体管性能的影响[J].*发光学报*, 2020, 41(03): 316–322.
- [5] 张继业,李雪,张建伟,等.垂直腔面发射激光器研究进展[J].*发光学报*, 2020, 41(12): 1443–1459.
- [6] 王小龙,邹永刚,郝永芹,等.宽范围、偏振稳定的 850nm 液晶可调谐垂直腔面发射激光器特性[J].*发光学报*, 2020, 41(10): 1287–1293.
- [7] 王傲,邹永刚,李明宇,等.高调谐效率 V 型腔可调谐半导体激光器设计与研究[J].*发光学报*, 2020, 41(08): 977–983.
- [8] 朱凡,李颖先,谭久彬.高精度激光光束准直系统设计[J].*光学精密工程*, 2020, 28(04): 817–826.
- [9] 杨滨赫,蔡引娣,文志祥,等.长距离激光测量中光束漂移的自动补偿[J].*光学精密工程*, 2020, 28(11): 2393–2402.
- [10] 代志诚,谷燕,张秀梅,等.具有高增益的 AlGaIn 日盲紫外雪崩光电二极管[J].*光学精密工程*, 2020, 28(12): 2614–2621.
- [11] 裘燕青,张刘刘,陈苗根,等.板上芯片集成封装发光二极管的光色检测系统[J].*光学精密工程*, 2016, 24 (1): 39–44.
- [12] 李乐,汪龙祺,黄煜,林冠宇,王维彪,张航,宋悦铭.光电探测系统噪声特性研究与降噪设计[J].*光学精密工程*, 2020, 28(12): 2674–2683.
- [13] 陈越,王彪,鹿洪飞,等.TDLAS 型 C₂H₂ 气体检测系统的光电检测电路研制[J].*激光杂志*, 2018, 39(04): 15–18.
- [14] 王林涛,李开成,张健梅.低噪声光电检测电路的设计和噪声估算[J].*武汉理工大学学报*, 2001, 23(3): 70–71.
- [15] 占建明,汶德胜,王宏,等.基于光电二极管的前置放大电路噪声分析[J].*半导体技术*, 2011, 36(04): 304–306.