

· 极端环境光学技术及应用 ·

基于 VCSEL 激光器的甲烷和二氧化碳检测系统设计

王彪¹ 戴童欣^{1,3} 程林祥^{1,2} 张瑞^{1,2} 俞泳波^{1,3} 连厚泉^{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: 近年来, 对温室气体的浓度监测常常选用无人机等设备, 无人机可以携带气体检测仪在高空环境下对气体进行移动监测。本文针对无人机设备集成的需求, 基于小体积、低功耗的新型 VCSEL 光源研制了“时分复用”型甲烷和二氧化碳双气体检测系统。系统选用 STM32H750 作为系统主控, 为 VCSEL 设计了专用的驱动电路和温控电路, 用模拟开关切换驱动信息, 实现了对气体浓度的分时检测。此外, 专为系统设计了上位机界面。将浓度数据通过串口上传至上位机后, 可以将数据绘制成可视化图表。经过实验测试, 系统稳定性高于 95.3%, 系统稳定性好, 显示界面直观。系统指标满足设计需求。

关键词: 甲烷; 二氧化碳; TDLAS; STM32H750

中图分类号: TN271.5 文献标识码: A doi: 10.14016/j.cnki.jgzz.2022.07.015

Design of methane and carbon dioxide detection system based on VCSEL laser

WANG Biao¹, DAI Tongxin^{1,3}, CHENG Linxiang^{1,2}, ZHANG Rui^{1,2},
YU Yongbo^{1,3}, LIAN Houquan^{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: In recent years, the concentration monitoring of greenhouse gases is often used by unmanned aerial vehicle, which can carry gas detectors to monitor the gases in a high-altitude environment. According to the requirements of UAV, this paper developed a "time division multiplexing" methane and carbon dioxide detection system based on a small-volume and low power consumption VCSEL light source. The system chooses STM32H750 as the main control. A drive circuit and a temperature control circuit were designed for the VCSEL laser. Time-sharing detection of the gas concentration can be achieved by switching the drive information with an analog switch. In addition, the upper-computer interface is designed for the system. After the concentration is uploaded through the serial port, the data can be drawn into a visual chart. The system stability is higher than 95.3%. The system stability is good, the display interface is intuitive, and the system indicators meet the system design demands.

Key words: methane; carbon dioxide; TDLAS; STM32H750

1 引言

上世纪九十年代以来, 中国以领先于世界工业三

倍的速度发展。在工业化快速发展的同时, 人类对环境和资源的破坏也逐渐加剧, 人们生产生活中需要消耗大量的煤、石油等化石能源, 其燃烧后会排放大量温室气体和污染物^[1], 如含碳化合物、二氧化硫和氮氧化物等有害物质^[2-3], 引发了酸雨、雾霾和沙漠化等的极端气候现象。为控制温室气体排放, 需要进行准确的、稳定高效的气体浓度监测。

近年来, 对温室气体的浓度监测常常选用无人机

收稿日期: 2022-03-14

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制项目(No. 61727822)

作者简介: 王彪(1981-), 男, 博士, 博士生导师, 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>

等设备,无人机可以携带气体检测仪在高空环境下对气体进行移动监测,对检测结果进行数据处理后可以构建区域温室气体浓度分布图,基于气体浓度数据,也可以建立相应的算法对气体浓度变化情况进行预测,因此,搭载无人机是气体浓度检测的最新研究方向。

考虑到搭载于无人机的设计需求,本文基于新型 VCSEL 光源^[4-5],引入可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术研制功耗低、体积小的“时分复用”型甲烷和二氧化碳双气体检测系统。该系统具有良好的安全性和无接触特性^[6-7],适用于各种复杂环境的远程监测。以往的研究主要采用DFB激光器作为核心光源,本检测系统选用功耗低、封装体积小的VCSEL激光器对甲烷和二氧化碳气体进行分时检测。本系统选择了STM32H750作为核心控制器,为VCSEL激光器设计了一套专用驱动电路和恒温控制电路^[8]。该系统具有双组分、功耗低、运行稳定等特点,可以远程对甲烷和二氧化碳进行实时浓度监测。经过实验测试得出结论,系统可以有效分时检测两种气体。利用上位机界面,可以便捷地切换气体,在气体浓度过高时报警。

2 系统基本设计

系统主要由以下部分组成:弱电流驱动电路、恒温电路、光电探测电路和数据采集电路、两只 VCSEL 激光器、光纤耦合器、Herriot 多反射气体吸收池、光电探测器以及各种光纤组件等。图 1 为系统的整体框图。

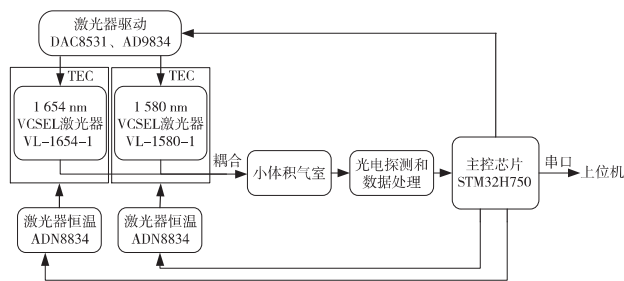


图 1 整体框图

主控器 STM32H750 控制驱动模块中 DAC8531 和 AD9834 输出目标波形,经模拟开关控制,使 1654nm 和 1581nm 的 VCSEL 激光器轮流扫频;主控对 TEC 控制器 ADN8834 输出 PID 信号,控制 TEC 制冷制热,维持激光器温度稳定;激光通入 17 m 光程的 Herriot 气室后,被光电探测器模块接收送至锁相放大器,定向提取二次谐波幅值并经由处理后上传至上位

机进行显示。

3 硬件电路设计

3.1 主控器电路

本文设计的甲烷和二氧化碳双组分气体检测系统采用时分复用技术对气体进行分时检测,考虑到分时控制激光驱动电路并采集锁相放大器的电压信号等都需要准确的时序控制^[9-10]。针对以上实际需求,主控器选用 ST 公司的嵌入式处理器 STM32H750。该芯片工作频率达到 480 MHz,集成 2 个 12 位 DA 和 3 个 16 位 AD。该芯片支持 SPI 和串口等常见通信接口,具有 35 个通信外设。STM32H750 丰富的内部资源以及足量的 IO 可以为系统性能提供支撑,满足本系统对主控芯片的性能需求。

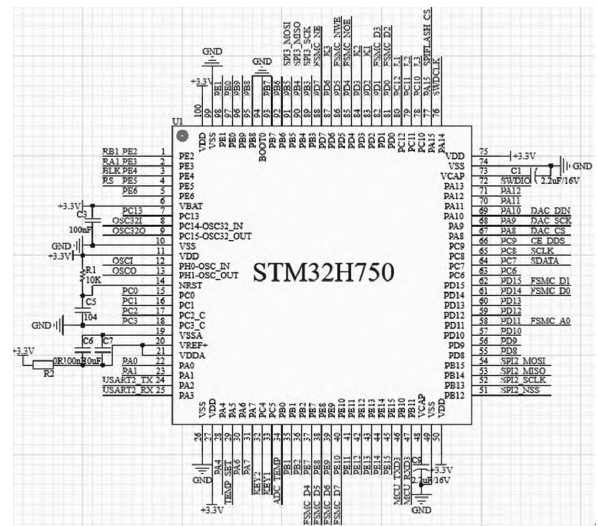


图 2 STM32H750 最小系统电路

最小系统如图 2 所示。本系统主控器通过通信接口控制 DAC8531 和 AD9834 发生锯齿波和正弦波,使用 IO 口输出翻转信号控制模拟开关 MAX4624,使驱动信号分时接入两只激光器;片上 AD 读取激光器内部集成 NTC 温度,依据读取温度计算 PID 控制量,向 TEC 控制器 ADN8834 输出;主控对数据进行处理后,通过串口上传至上位机显示。

3.2 驱动信号产生电路

3.2.1 扫描信号发生电路

TDLAS 技术要求激光扫过选定的待测气体吸收峰,由于激光器输出波长在一定范围内是线性关系,因此,需要电流调谐使激光器扫描一定的区间^[11]。为使 VCSEL 激光器扫描气体吸收峰,需要设计扫描电路。本系统扫描电路由 TI 公司的数模转换器 DAC8531 为核心,如图 3 所示。

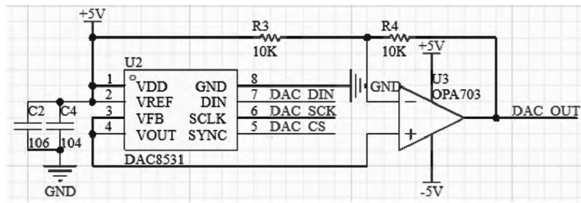


图3 低频扫描信号发生电路

DAC8531 是一种低功耗、轨对轨的 16 位电压输出 DAC。DAC8531 使用了一个多功能的三线串行接口,兼容标准的 SPI、QSPI 等接口,以高达 30MHz 的时钟速率运行。该部件 +5 V 供电时的功耗极小,静态电流较低,低功耗的特性使其非常适合于便携式设备。该芯片有上电置零的功能,可以在无输入信号时保证输出信号为 0,达到保护激光器的目的。

3.2.2 扫描信号发生电路

由于需要测定低浓度的气体,测定时的光强衰减量往往很小,探测器接收到有用信号会湮没于噪声中,难以进行提取。为解决该问题,引入波长调制技术(WMS)。波长调制技术可以有效避免噪声干扰,定向提取噪声中的微弱信号。采用高低频信号叠加的方式,高频波承载气体浓度信息,在后续的锁相放大环节中,提取经气体吸收后的高频信号中的二次谐波幅值,可以实现对气体浓度的标定。

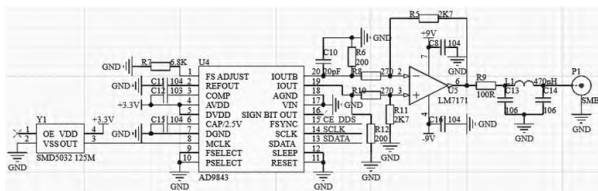


图4 高频调制信号发生电路

本文选用 Analog Devices 公司的 DDS 芯片 AD9834 为调制波形提供正弦波,电路如图 4 所示。

3.2 恒温控制模块

当激光器注入电流变化时,激光功率随着电流强度的升高而升高,激光器功率升高会导致激光器输出波长红移,使系统测量精度下降。因此,需要设计稳定的控温电路^[12-13]。依据激光器的参数可知,本文选择的激光器的工作温度范围在 15~35℃,为满足在一定温度下电流调谐的需求,本节选用半导体制冷器控制激光器恒温。本系统需要对两路激光器进行温度采样,因此选用 STM32H750 片上模数转换器对激光器内部集成的 NTC 进行温度采样。并选用 AD 公司的 TEC 控制器 ADN8834 对 TEC 片进行控制。本文设计的温控电路如图 5 所示。

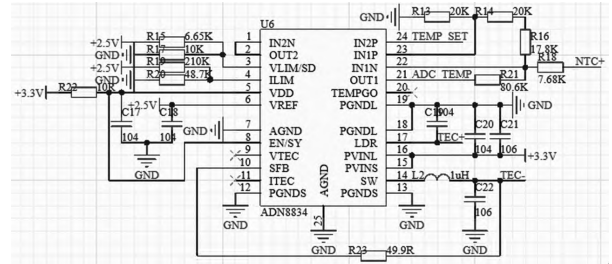


图5 激光器恒温控制电路

ADN8834 在 2.7 V~5.5 V 的输入电压范围内工作。该芯片功能丰富,内部集成了功率 MOSFET 型 H 桥和两个自校正运放,提供 PWM 驱动器和功率 MOS 型 H 桥。依据热传感器的反馈,使用主控器输出 PID 算法来调制信号,完成 TEC 的闭环热控制,可维持极佳的长期温度稳定性。此外,该芯片提供 TEC 电压和电流工作监控引脚,能够实时控制 TEC 上的电流电压,以免造成超额损坏。经过测试,该模块可以稳定控制激光器温度,控制时间短,精度高。

3.3 软件流程

系统程序工作的核心在于定时器中断,依据定时器中断,系统将自动控制 DAC 和 DDS 输出对应的调制波形、开启关闭 DDS 输出、开启关闭片上 ADC 的 DMA 通道。其中图 6 为系统软件流程图。

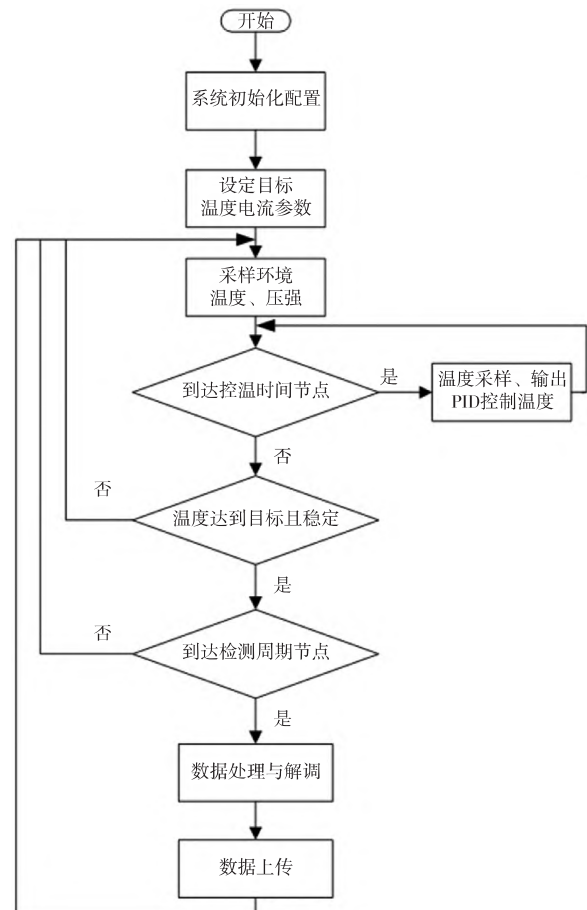


图6 系统软件流程图

系统上电后将首先进行 MCU 外设初始化和外围芯片初始化。初始化的外设包括定时器、DMA、SPI、串口、IO、ADC 和中断等,初始化的外围芯片包括 DDS、DAC、ADC 和 TFT 屏等。主程序在时间节点的控制下,循环控制温度并实现 ADC 采集谐波信息的处理工作。

定时器中断程序在每次输出完 3/4 周期的调制波后,会通知主循环进行数据处理,数据处理时首先读取气体温度、压强,通过前文所介绍的数据处理方法,经由模拟开关的时序控制,可以得到两种气体的浓度信息。得到气体浓度后,主程序会通过 SPI 接口控制屏幕显示气体温度压强信息,并通过串口将环境温度、压强和气体浓度数据发送到上位机。图 7 为定时器中断流程图。

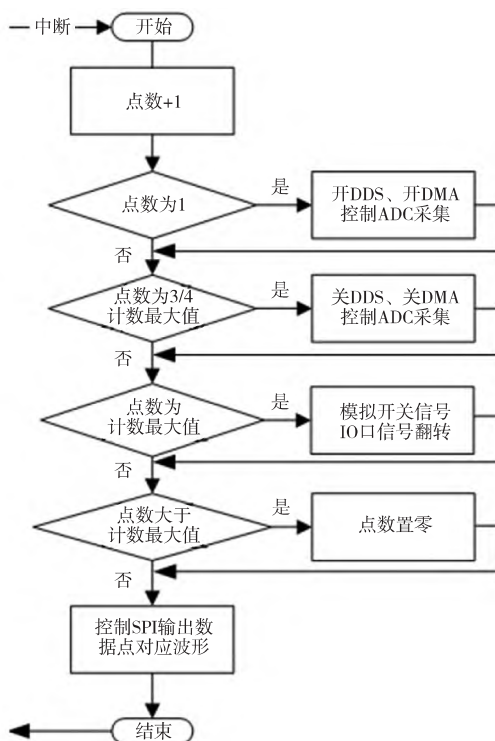


图 7 定时器中断流程图

定时器中断程序会通过一个全局变量计算进入中断的次数,依据进入的次数来执行不同的控制功能,由于定时器中断具有严格的时序特征,因此主控芯片能依此输出时序严格的调制波形,并实现实时处理。

3.4 上位机界面

为便于后续实验数据显示,采用软件开发工具 GUI 编写上位机界面。该界面通过串口上传检测数据,可以任意切换待测气体,实时监测浓度,计算 5min 内平均浓度。通过报警窗口,在气体实时浓度或平均

浓度高于设定浓度时进行报警,此外,设计了清空按钮用于将已采集图表清零。



图 8 系统上位机界面

经实测证明,该上位机界面能够以可视化图表的方式直观的展现检测数据,可以切换气体,并设置报警浓度。

4 实验结果

在实验环境温度为 25 °C,气压为 1 atm 标准大气压的条件下进行实验。为测试系统稳定性,向气室充入 500 ppm 的甲烷和 2 000 ppm 的二氧化碳混合气体并进行了为时 10 h 的检测,系统每 2 s 输出一次检测结果,检测结果如图 11 所示,其中上图为甲烷二次谐波波动数据,下图为二氧化碳二次谐波波动数据。

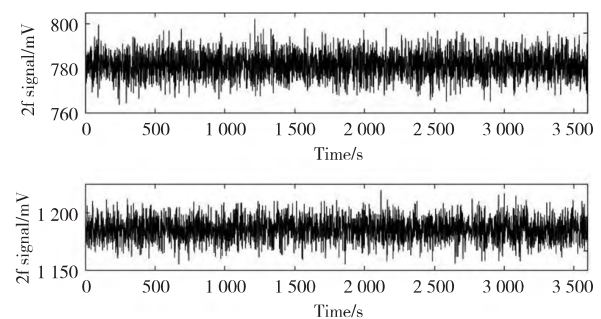


图 9 系统稳定性测试

在 10 h 内甲烷的二次谐波幅值波动范围为 768.5~799.5 mV,因此,甲烷在长时间测试中最大误差低于 4.3%。二氧化碳的二次谐波幅值波动范围为 1 158.1~1 212.6 mV,二氧化碳在长时间测试中最大误差低于 3.4%,系统稳定性较好。

5 结论

本文选用小体积的 VCSEL 激光器,基于 TDLAS 技术设计了一套 CH₄ 和 CO₂ 复合气体传感系统。本

系统选用 ST 公司的嵌入式处理器 STM32H750,并为 VCSEL 光源设计了驱动模块和恒温模块;系统采用定时器中断作为软件控制核心,并为检测系统设计了直观可调的上位机界面。经实验结果测定,系统稳定性较好,检测误差小于 4.3%,上位机界面可以记录一段时间内的气体浓度变化。检测系统稳定性好,精度较高,此系统可集成在无人机进行高空气体检测,同时可应用在多种场景。

参考文献

- [1] 陈晓,罗送花.新疆煤、石油、天然气生产消费趋势分析[J].生态经济(学术版) 2014,30(01):181-185.
- [2] 李国林,焦月,马坤,鄢志丹,张雪娜,吴赞辉,张泽成.应用经验模态分解的近红外 CO₂ 浓度反演系统[J].光学精密工程 2021,29(05):940-950.
- [3] 张引,邵俊峰,汤伟.TEA CO₂ 长波红外激光对红外凝视成像系统探测器组件的损伤效应[J].光学精密工程,2021,29(06):1217-1224.
- [4] 张继业,李雪,张建伟,宁永强,王立军.垂直腔面发射激光器研究进展[J].发光学报 2020,41(12):1443-1459.
- [5] 许非,周晓彬,刘政波,赵刚,马维光.近红外光学反馈线性腔增强吸收光谱技术[J].光学精密工程,2021,29(05):933-939.
- [6] 王小龙,邹永刚,郝永芹,马晓辉,刘国军.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] 王彪,鹿洪飞,李奥奇,陈越,戴童欣,黄硕,连厚泉.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(04):131-137.
- [8] 吴根柱,林春婷,卢俊城,马倩倩.七芯光子晶体光纤温度传感器[J].光学精密工程 2021,29(05):951-957.
- [9] 尚凡,戚悦,马丽娜,蒋鹏,陈羽,王俊,熊水东.基于光纤光栅的时分复用传感阵列相位噪声研究[J].光学学报,2021,41(13):93-103.
- [10] 陈祖峰,左发兴,胡亮,金禧,陈建平,吴龟灵.基于双向时分复用同纤同波传输的时间同步系统[J].中国激光,2021,48(09):159-164.
- [11] 王彪,鹿洪飞,李奥奇,戴童欣,黄硕,连厚泉.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(06):40-43.
- [12] 丁向美,钟乐海,董静霆,杨江.分布式反馈激光器模拟控温检测系统研制[J].强激光与粒子束 2021,33(11):118-125.
- [13] 张玮,李兆隆,郭平,赵建业.DFB 激光器饱和吸收稳频的精密温控系统设计[J].半导体光电,2020,41(04):560-565.
- [14] 冯先超.光伏发电系统上位机软件的设计与实现[D].西安电子科技大学 2020.