

· 激光物理与器件 ·

复合式 VCSEL 型 CO 和 CH₄ 激光气体检测系统设计王彪¹, 程林祥^{1,2}, 薛金波^{1,2}, 张瑞^{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:一氧化碳(CO)和甲烷(CH₄)是大气中主要的污染性气体,而且二者都属于易燃易爆气体。一氧化碳和甲烷浓度检测在人民生活各个领域都具有重要意义。因此,本文开展了 VCSEL 型 CO 和 CH₄ 双组分 TDLAS 气体检测系统的研究。针对双组分气体检测,提出了一种双波长分时扫描式自主校正检测技术,消除了光信号的交叉干扰,实现了单信号环路对双组分气体的高精度检测;针对 VCSEL 激光器工作温度稳定性要求高和阈值电流低等工作特性,设计了高精度温控电路和精密电流驱动电路;针对双组分气体光电探测器信号幅值不同的特点,设计了偏压和增益数控可调的光信号采集处理电路。本系统进行了整体性能测试,稳定性较好。

关键词:CO;CH₄;复合式;TMS320C6746**中图分类号:**TN271.5 **文献标识码:**A **doi:**10.14016/j.cnki.jgzz.2023.07.027Design of a composite VCSEL CO and CH₄ laser gas detection systemWANG Biao¹, CHENG Linxiang^{1,2}, XUE Jinbo^{1,2}, ZHANG Rui^{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: Carbon monoxide (CO) and methane (CH₄) are the main polluting gases in the atmosphere, and both are flammable and explosive gases. The detection of carbon monoxide and methane concentrations is of great significance in various fields of people's production and life. Therefore, this article conducted research on the VCSEL type CO and CH₄ dual component TDLAS gas detection system. A dual wavelength time-sharing scanning autonomous correction detection technology is proposed for dual component gas detection, which eliminates cross interference of optical signals and achieves high-precision detection of dual component gases in a single signal loop; A high-precision temperature control circuit and a precision current drive circuit were designed to address the high temperature stability requirements and low threshold current characteristics of VCSEL lasers; A light signal acquisition and processing circuit with CNC adjustable bias and gain was designed to address the different signal amplitudes of dual component gas photo-detectors. This system has undergone overall performance testing and has shown good stability.

Key words:CO; CH₄; Composite; TMS320C6746

1 引言

近年来,城市化进程的不断加快使得污染性气体

甲烷(CH₄)、一氧化碳(CO)等大量排放,加剧了气候变化,为环境保护带来了极大压力。在煤炭生产、储存和运输以及工业生产方面,CO、CH₄等可燃气体浓度一旦超过安全阈值,极易诱发中毒事故和爆炸事故,是影响公众生命财产安全的潜在隐患^[1]。因此,实现对危险气体浓度精确监测在精准预报大气环境质量、陆基能源勘探开采、工业安全生产等领域具有

收稿日期:2023-03-21

基金项目:吉林省科技发展计划重点科技研发项目(No. 20220203016SF)

作者简介:王彪(1981-),男,博士,副研究员,博士生导师,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>

重大意义。

近年来, TDLAS 技术在气体检测领域得到了广泛应用。2013 年, Ritobrata Sur 等人基于 TDLAS 技术利用四种不同波长范围的 DFB 激光器, 成功实现了 CO、CO₂、CH₄ 和 H₂O 的同时检测^[2]; 2016 年, Yajun Yu 等人研制了一种基于连续波外腔量子级联激光器的多组分气体检测系统^[3]; 2017 年, Oliver Diemel 等人提出了一种基于 TDLAS 和时分复用(TDM)检测技术的用于内燃机排气原位诊断的多物种摩尔分数和温度传感器^[4]; 2020 年, Sunghyun So 等人采用 TDLAS 技术测量电炉和燃烧系统中的 O₂ 和 CO, 核心光源为 DFB 激光器^[5]。现阶段多组分气体检测系统很多都是采用分时扫描的技术实现多组分气体检测, 因此, 本文选择分时扫描的技术实现双组分气体检测。目前, VCSEL 型 TDLAS 气体检测系统研究较少, 而且 VCSEL 激光器具有体积小、功耗低的优势, 所以, 本文选择 VCSEL 激光器为 TDLAS 气体检测系统的核心光源, 并针对激光器工作特性提出了软硬件设计方案。

2 系统总体方案设计

该系统主要包括电学模块和光机模块, 如图 1 所示。电学模块主要实现了激光器的驱动控制、光电探测信号的采集处理和人机交互, 包括激光器温控电路、激光器驱动电路、光信号采集处理电路等, 光机模块主要搭建了分时扫描式自主校正光路。DSP 主控芯片为 TMS320C6746, 通过传输数字信号控制激光器驱动单元、温控单元和数据采集单元等, 在其内部实现了数字正交锁相放大功能, 极大提升了系统的集成度。

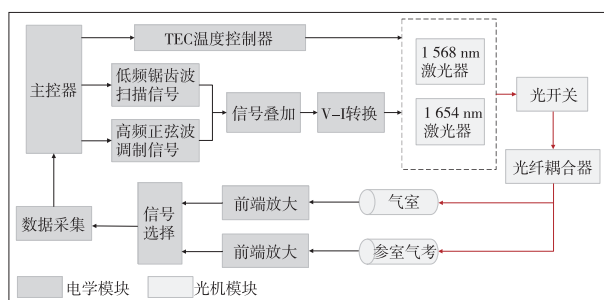


图1 系统整体框图

3 电路设计

3.1 主控器简介

激光气体检测系统工作的核心控制单元是主控电路。主控器需要精确控制激光器的驱动信号, 快速地稳定激光器温度, 实时采集光电信号, 进行数字正交锁相放大运算, 反演气体浓度, 还需要与上位机进

行交互, 因此需要选择高性能和资源丰富的处理器。本文选用 TI 公司的 TMS320C6746 处理器。该处理器主频可达 456MHz, 有 6 个算术逻辑单元(Arithmetic Logic Unit, ALU), 支持 32 位整型、单精度(Single Precision, SP)和双精度(Double Precision, DP)浮点数, 2 个乘法功能单元, 支持复杂的乘法。

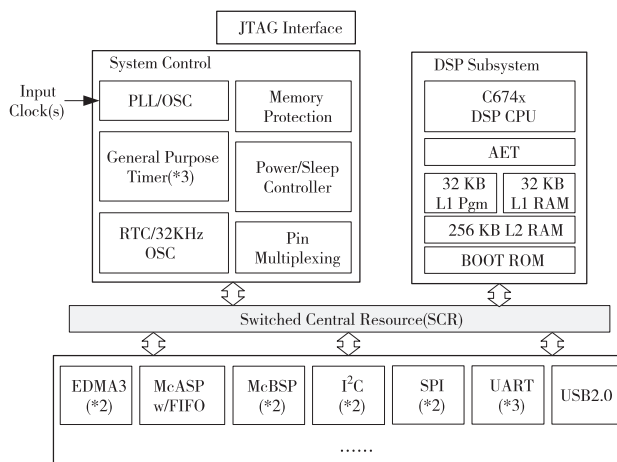


图2 TMS320C6746 功能框图

3.2 双波长分时扫描式自主校正光机结构设计

本文设计了分时扫描式自主校正光学结构和自主采样气路, 该部分主要由 VCSEL、光开关、光纤耦合器、气室、CO 和 CH₄ 复合参考气室、光电二极管等组成。激光器的出射光经过光开关依次选通, 被 9:1 光纤耦合器分成测量光路和参考光路, 测量气室内装有反射镜组, 可以进行多次反射, 在较小体积内实现长光程, 被测量气室内的采样气体充分吸收后, 气室尾部的光电二极管将光信号转为电流信号。

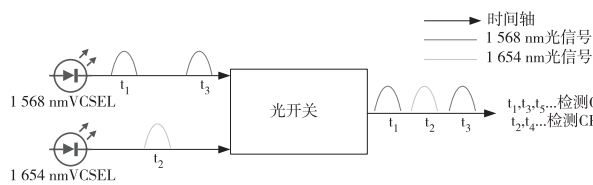


图3 光学分时扫描实现双组分检测示意图

针对双组分气体检测, 本文设计了分时扫描式气体检测方法, 光学分时扫描实现过程如图 3 所示, 系统分时驱动激光器, 通过光开关切换光路, 在满足定时和同步的条件下, 光电探测器可以分别在各时隙中接收到各信道的信号而不混扰, 实现了单组光路和电学系统检测双组分气体浓度的功能, 消除了光信号的交叉干扰, 减小了系统复杂度, 提升了系统稳定性。

3.3 激光器温控电路

3.3.1 NTC 温度反馈环路

激光器温控驱动单元主要包括 NTC 温度反馈环

路和 TEC 驱动电路^[6]。NTC 温度反馈环路部分如图 4 所示,由于电桥具有测量准确,利于换算,有效减小共模干扰等优点,被广泛应用于测量领域,通过设计如下图所示的电桥转换电路实现 NTC 阻值与电桥电压的转换,其中电桥平衡时,NTC 的阻值与其同侧的上臂阻值($R_{22}+R_{MCP4531}$)相同^[7]。

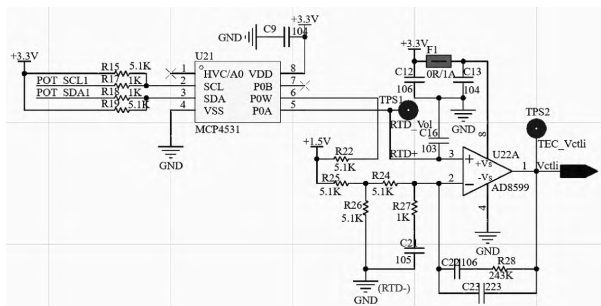


图 4 NTC 温度反馈环路

3.3.2 TEC 驱动电路

激光器内部集成了 TEC,TEC 利用半导体的热效应来工作:接通直流电,一端降温,另一端升温,电源反接,温度变化相反。根据 TEC 的特性,改变流经 TEC 的电流大小和方向就能实现单端的制冷或加热。TEC 具有无噪声、工作可靠、控制简单、便于集成等优点。

TEC 驱动电路如图 5 所示。CTLI 以 REF(1.5 V)为参考中心,当 CTLI = 1.5 V 时, $I_{TEC} = 0$;当 CTLI > 1.5 V 时,电流方向为由 OS2 到 OS1;当 CTLI < 1.5 V 时,电流方向为由 OS1 到 OS2。因此通过改变 CTLI 引脚的电压就可以改变 TEC 的工作方式(加热或制冷)和功率。该温控驱动单元的控制回路为模拟量的反馈和转换,具有连续性好、控制精度高的优点。经测试,最终温度控制精度可达 0.01 °C。

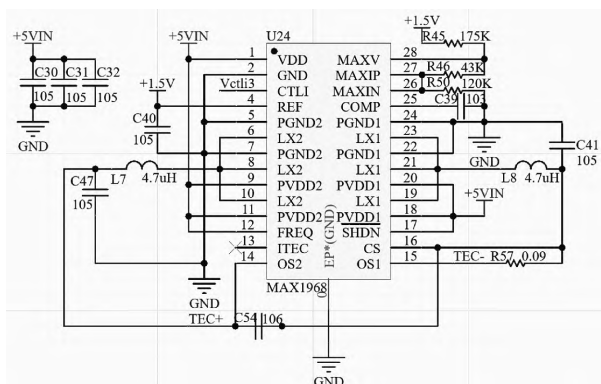


图 5 TEC 驱动电路

3.4 激光器恒流驱动电路

考虑到 VCSEL 激光器的低阈值电流和工作电流,需要设计一款能够高精度实现电流驱动电路。通过查询激光器的波长调谐参数 CTC (Current Tuning

Coefficient) 可知,需要将波长的调制精度控制在 2pm 以下,则电流的控制精度需要保证在 10 μA 的范围。得到调制电压信号之后,需要通过压控恒流源电路将调制的电压信号转换为激光器驱动电流信号。VCSEL 激光器的驱动电流在 20 mA 以内,且电流信号的微弱变化就会引起激光器输出波长的变化,电流噪声的大小是压控恒流源电路主要考虑的因素^[8]。压控恒流源电路如图 6 所示。

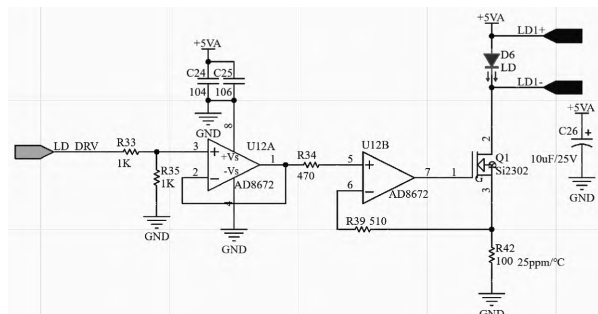


图 6 压控恒流源电路

压控恒流源反馈控制时,运算放大器正相和反相输入端之间存在一定的微小压差,导致输出电流与实际电流有差异,所以通过选择开环增益倍数较大的低噪声运算放大器来提高电流控制的精度^[9]。此处采用 AD 公司的 AD8672 作为驱动的运算放大器,具有最小 120 dB 的开环增益,符合本模块的设计需求。压控恒流模块主要采用两级运放级联的方式实现,前一级主要对调制电压进行衰减,以满足后级的压控电压输入范围。该电路的采样电阻阻值为 100 Ω,其具有高精度和低温漂的特点,当电流最大为 20 mA 时,采样电阻上的功耗为 0.04 W。为了保证电阻的工作稳定和散热能力,选用 1%精度 25 ppm/°C 的 1206 封装电阻。

3.5 光信号采集处理电路

光信号采集处理电路主要包括偏压和增益数控可调的光电前端放大电路和数据采集电路。两个光电二极管分别将测量光路和参考光路的透射光转换成微弱电流信号,再经光电前端放大电路转换为电压信号。电压信号经过模拟开关选择传输至数据采集电路,最后经数据接口传输至主控器中进行处理。由于本系统要实现双组分气体的检测,两种信号的幅值不一样,幅值过大会导致输出饱和,幅值过小会丢失有用信号^[10]。而且,由于激光器存在阈值电流,扫描光信号的起始点存在初始光强,经转换的电压信号存在初始偏压。因此设计了偏压和增益数控可调的光电前端放大电路,如图 7 所示。

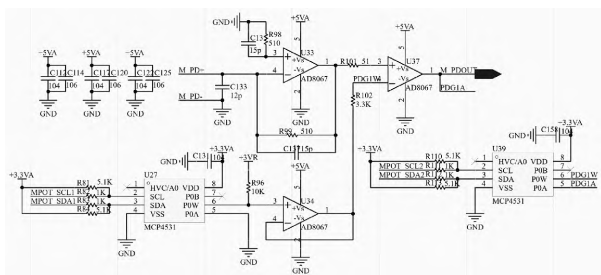


图 7 光电前端放大电路

信号采集电路将模拟信号转换为数字信号,便于进行后续数据处理。同时,其对数字正交锁相放大器信号转换十分重要,信号的采样率过低会丢失高次谐波信号分量,影响数字锁相放大器的检测精度^[11-12]。所以,本文选用 ADI 公司的采样率 1MSPS、16 位 ADC 芯片 AD7915 搭建信号采集电路,如图 8 所示。

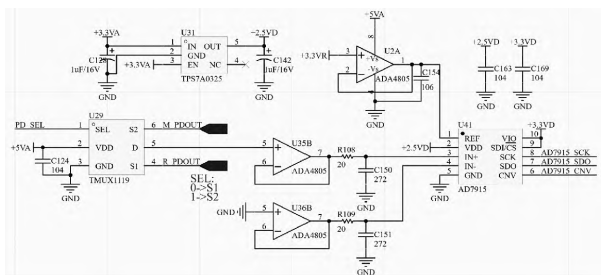


图 8 信号采集电路

4 软件设计

本文设计了分时检测双组分气体的软件整体架构。各个模块均有外部接口函数,能够根据需求进行调用。激光气体检测系统的整体流程如图 9 所示。

首先,进行系统初始化,包括串口、定时器和 SPI 等片上外设和波形发生器、ADC 和 DAC 等外围芯片。初始完成后,系统进行气体吸收峰位置校准,然后进入 DAS 和 WMS 转换架构。首先,系统运行温控程序,保证两路激光器温度都处于稳定状态。其次,选通一路光信号链路,系统采用 DAS 模式进行检测并计算吸光度,将吸光度和预设阈值下限进行比较,如果大于预设阈值下限,继续采用 DAS 模式计算出气体浓度,否则采用 WMS 模式计算出吸光度,将吸光度和预设阈值上限进行比较,如果小于预设阈值上限,继续采用 WMS 模式计算出气体浓度,否则重复该步骤。最后,完成一种气体浓度检测后,切换至另一路光信号链路,继续采用当前的模式,进行循环。

本系统在 DAS 模式和 WMS 模式下都会进行模式判断,保证了系统能够根据气体浓度的实时变化选择最合适的检测模式。此外,设置了切换阈值下限和上限,目的是防止出现两种模式重复切换的现象^[13]。

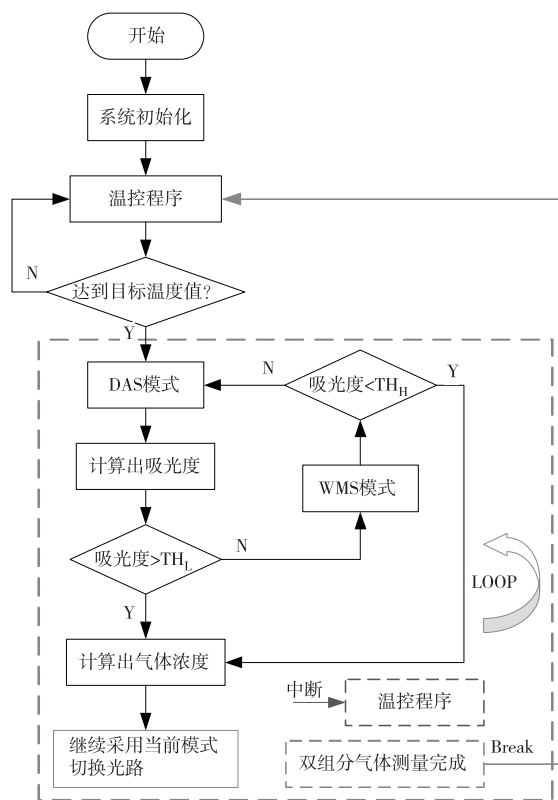


图 9 软件整体流程图

5 实验结果

5.1 激光器整体环路测试

搭建系统测试环路,向气室内通入待测气体,选通测量光路,激光器驱动波形、光电前端放大电路测试波形和二次谐波信号如图 10 所示。

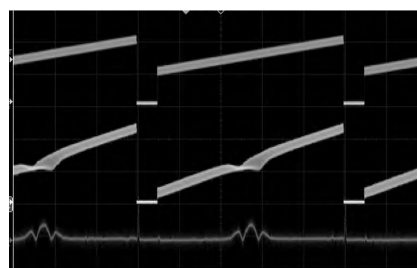


图 10 系统测量波形

由图可知,激光器能够稳定产生调制光信号,光电前端放大电路能够较好地还原调制光信号波形,并且能够进行增益和偏压调整,二次谐波信号波形稳定,可以有效检测出低浓度气体。

5.2 系统稳定性测试

在实际工作时,系统需要对危险气体进行长期的实时监测,所以,还需要对气体检测系统进行稳定性实验^[14]。测试时,向气室内通入 500 ppm 的标准气体,进行连续 30 min 的测量,采样间隔为 2 s,测量得

到的 CO 和 CH₄ 气体浓度变化如图 11 所示。

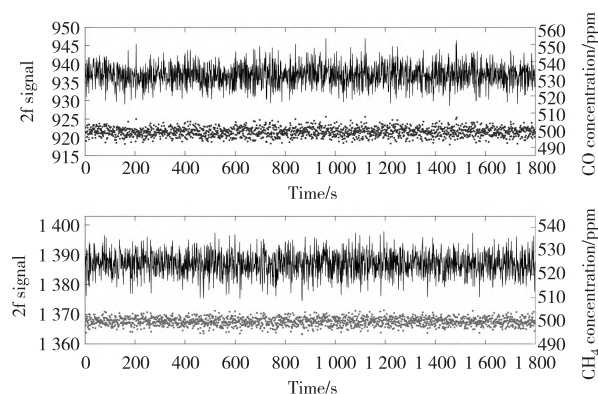


图 11 系统稳定性测试结果

由图可知,CO 气体浓度变化在 490.3 ppm 到 506.4 g/m³ 以内,相对变化量小于 3.2%,CH₄ 气体浓度变化在 494.3 g/m³ 到 505.7 g/m³ 以内,相对变化量小于 2.3%。由以上数据可知,气体检测系统在长时间测量中具有良好的稳定性。

6 总结

复合式 VCSEL 型 CO 和 CH₄ 激光气体检测系统在污染性气体监测、危险性气体预警和人体呼气检测等方面都有非凡的应用前景。本文以 VCSEL 激光器为核心光源,结合 TDLAS 技术和分时检测技术,研制了复合式 CO 和 CH₄ 激光气体检测系统。本文设计了高精度温控电路、精密电流驱动电路、偏压和增益数控可调的光信号采集处理电路,实现了双组分气体浓度的精确测量。实验表明,该系统检测波形稳定,可以有效检出低浓度气体,稳定性较好。

参考文献

[1] 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):53-61.

[2] Sur R, Sun K, Jeffries J B, et al. Scanned-wavelength-modulation-spectroscopy sensor for CO, CO₂, CH₄, and H₂O in a high-pressure engineering-scale transport-reactor coal gasifier[J]. Fuel, 2015, 150:102-111.

[3] 余迪.矿用近红外甲烷和一氧化碳气体检测系统的研究[D].长春:吉林大学,2022.

[4] Oliver Diemel, Rene Honza, Carl-Philipp Ding, Benjamin Böhm, Steven Wagner. In situ sensor for cycle-resolved measurement of temperature and mole fractions in IC engine exhaust gases[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(2): 1453-1460.

[5] Sunghyun So, Dae Geun Park, Nakwon Jeong, Daehae Kim, Jungho Hwang, and Changyeop Lee. Study on the Simultaneous Measurement of O₂ and CO Concentrations in the Exhaust Gas of a Methane/Air Flame Using Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy [J]. Energy & Fuels, 2020, 34(3): 3780-3787.

[6] 林振云.基于 DSP 的半导体激光器恒温控制器的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

[7] 赵建锐,王海涛,武玉华.一种基于 AVR 和 NTC 的自容式海水温度测量电路[J].电子世界,2022(02):204-205+207.

[8] Alexander Kerschhofer, Philipp Breitegger, Alexander Bergmann. Laser Driver and Analysis Circuitry Development for Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy of NO₂ for IoT Purpose [J]. Proceedings, 2018, 2(13): 1062.

[9] 肖支才,董旭良,鹿玉国,常明山.一种新型精密电流源设计[J].仪表技术,2015(04):47-50.

[10] 赵玉玲.基于光斑位置检测系统的双通道数字锁相放大器研究[D].长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2018.

[11] 熊佳慧.基于 TDLAS 技术的气体浓度检测系统设计及温度补偿研究[D].南京:南京理工大学,2020.

[12] 陈越.基于 TDLAS 技术的小型化乙炔气体检测系统的研制[D].长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2019.

[13] 曹榕.基于 TDLAS 技术甲烷气体浓度测量系统的实现[D].南京:东南大学,2019.

[14] Ren Qiang, Chen Chen, Wang Yanzhang, et al. A prototype of ppbv-level mid-infrared CO₂ sensor for potential application in deep-sea natural-gas-hydrate exploration [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 7200-7208.