

· 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>

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]。

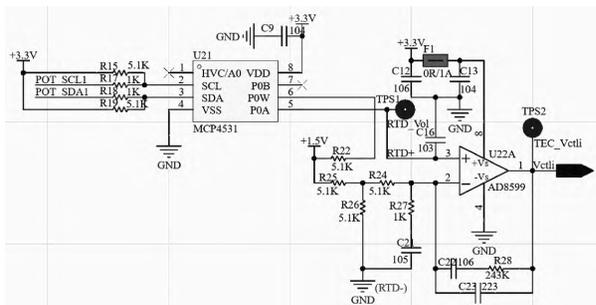


图 4 NTC 温度反馈环路

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。

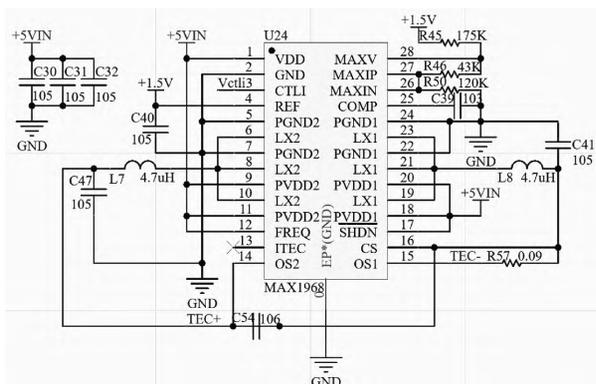


图 5 TEC 驱动电路

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 μ A 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。

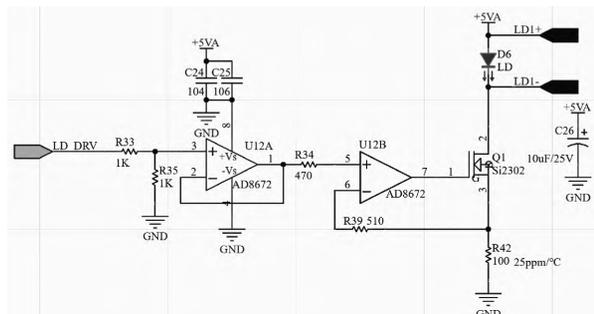


图 6 压控恒流源电路

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。

到的 CO 和 CH₄ 气体浓度变化如图 11 所示。

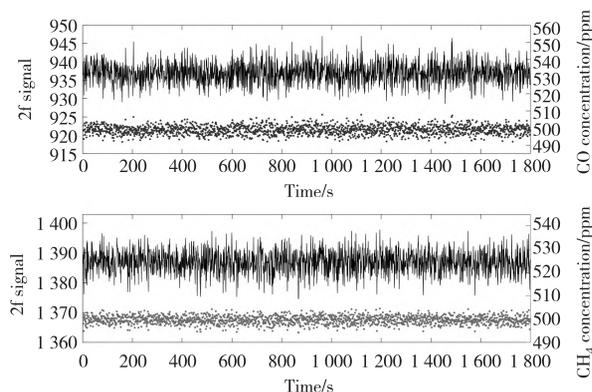


图 11 系统稳定性测试结果

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.