

• 极端环境光学技术及应用 •

TDLAS 系统动态光强跟踪检测电路研制

王 彪¹ 俞泳波^{1 3} 张 瑞^{1 2} 程林祥^{1 2} 戴童欣^{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: TDLAS 系统利用气体对特定波长的激光吸收的原理进行气体检测 ,激光的光强稳定性对系统的检测精度和稳定度有着重要的影响。针对 TDLAS 系统激光器光强的变化 ,本文研制了动态光强跟踪检测电路。电路采用 STM32H7B0 作为主控制器 ,设计了低噪声的高速前置放大器 ,并使用压控放大器 AD8367 调整电路的增益。主控芯片实时检测光强变化情况 ,并控制放大器调整检测电路的增益 ,实现动态光强跟踪。经过测试 ,该检测电路可以根据激光器光强变化实时的调节增益 ,稳定的输出电压信号 ,消除了激光器光强的变化对 TDLAS 检测系统的影响。

关键词: TDLAS; 光电探测; 光强跟踪; STM32H7B0

中图分类号: TN271.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.14016/j.cnki.jgzz.2022.06.009

Development of dynamic light intensity tracking detection circuit for TDLAS system

WANG Biao¹ , YU Yongbo^{1 3} , ZHANG Rui^{1 2} , CHENG Linxiang^{1 2} ,
DAI Tongxin^{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: The TDLAS system uses the principle of gas absorption of specific wavelengths of laser light to detect gas. The stability of the light intensity of the laser has an important impact on the detection accuracy and stability of the system. Aiming at the change of laser light intensity of TDLAS system , a dynamic light intensity tracking detection circuit is developed in this paper. The circuit uses STM32H7B0 as the main controller , designs a low-noise high-speed preamplifier , and uses the voltage-controlled amplifier AD8367 to adjust the gain of the circuit. The main control chip detects changes in light intensity in real time , and controls the amplifier to adjust the gain of the detection circuit to achieve dynamic light intensity tracking. After testing , the detection circuit can adjust the gain in real time according to the change of the laser light intensity , and output the voltage signal stably , which eliminates the influence of the change of the laser light intensity on the TDLAS detection system.

Key words: TDLAS; photoelectric detection; light intensity tracking; STM32H7B0

1 引言

近年来 ,我国不断加大了深海、深地、极极地及外太空领域等极端环境的探索。在探索极端环境的过

程中 ,对环境中的气体的种类和浓度进行测量有着重要的科研价值。例如在深海探测中 ,检测海水中溶解的气体浓度对海底能源勘探 ,海洋生态环境研究具有重要意义^[1]。而由于应用场景的特殊性 ,对气体测量仪器的要求也更为严苛。

对于气体的测量 ,目前存在有多种不同原理和方法的检测技术^[2-3]。其中基于 TDLAS 原理的气体检测系统 ,由于其采用光谱检测原理 ,可以更容易实现仪器的小型化 ,且具有检测精度高、无耗材、不易受干

收稿日期: 2022-03-09

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制项目(No.61727822) 、白求恩医学工程与仪器中心项目(No.BQEGCZX2021023)

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>

扰等特点^[4]。相比于其他气体检测仪器,在应用于极端环境的气体探测时,能够更稳定、精确的实现气体浓度的测量。

TDLAS 气体检测系统利用气体的光谱吸收特性,使用激光器产生特定波长的光,被气体吸收后会产生对应的吸收峰。利用光电探测器接收被气体吸收过的激光,可以从中获取到气体的浓度信息^[5]。对于工作在近红外波段的 TDLAS 系统,目前主要使用半导体激光器如 DFB 激光器、VCSEL 激光器作为光源^[6-7],不同类型的激光器出射光强不同,且由于激光器的制造工艺等原因,即使是同一型号的激光器其出射光强和电流的关系都无法完全相同^[8]。另外相关研究显示,半导体激光器在长时间工作后会存在一定的光强衰减的现象^[9]。

根据气体吸收的相关理论,激光器出射光强的变化会直接导致最终气体测量结果的变化。为了消除不同激光器的出光功率不同导致的光强变化,可以调整激光器驱动的电流大小改变光强的大小。但驱动电流的变化会造成波长随之改变,一旦波长偏移到气体吸收峰之外,则无法获得气体的吸收光谱,从而使系统无法工作。而且对于长时间工作后的光强衰减,这种方式也无法很好的解决问题。

为了解决由于上述原因导致的激光器光强的变化对最终测量结果的影响,本文设计了动态光强跟踪检测电路,可以通过调整激光接收端光电探测器放大电路的增益倍数,使得最终输出信号能够根据光强变化而变化,实现动态光强跟踪。

2 系统总体方案设计

TDLAS 系统通过调制激光器的输出的激光波长,当激光波长和气体吸收峰相同时,激光的能量就会被气体吸收^[10]。通过光电探测器测量被气体吸收过的激光光强变化情况,再经过相关的算法进行分析处理,可以得到气体的浓度信息。光电探测器输出的是电流信号,用于 TDLAS 系统的光电探测器放大电路一般使用前置放大电路^[11],先将电流信号转化为电压信号,再将电压信号放大一定倍数后输出给数据采集系统。本设计为了实现动态光强跟踪,在此基础上增加了自适应增益控制功能。

系统有两个输入通道,其中通道 1 用于测量待测气体,通道 2 而则用于实时检测激光器的光强变化情况,实现自适应增益控制。光路设计上,在激光器发射端,使用分光器将激光分成测量光和参考光,测量光用于气体浓度的测量,参考光用于激光器出射光强的测量。电路设计上,通道 1 和通道 2 包括相同的前置放大电路和压控放大电路,采用的 STM32H7B0VBT6 作为主控电路。系统总体框图如图 1 所示。

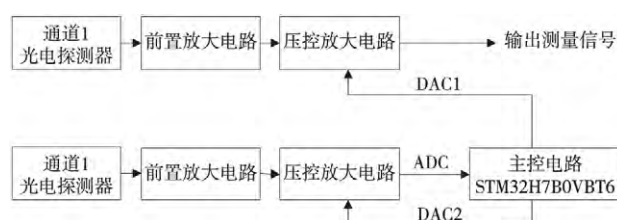
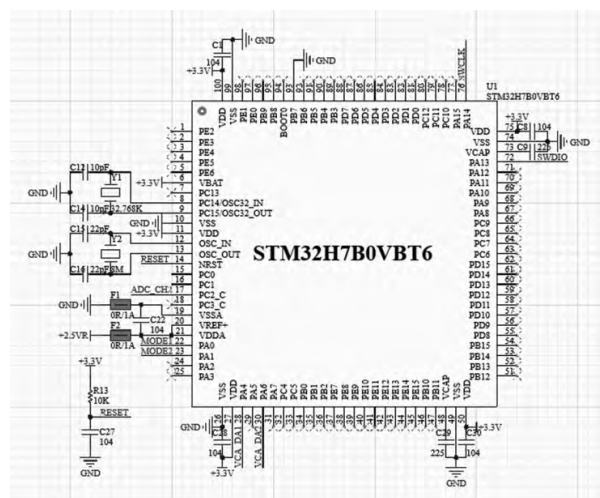


图 1 系统总体框图

3 电路设计

3.1 主控电路

由于 TDLAS 系统的光电探测器接收到的是调制后的激光,要想从中获取光强信息,需要使用高速 ADC 进行采集,同时还需要快速的对采集到的数据进行处理分析,并输出稳定的模拟电压控制压控放大器。因此本设计采用意法半导体公司的 STM32H7B0VBT6 单片机作为主控制器,最高主频达 280 MHz,具有 128 Kb 的 FLASH 和 1.4 Mb 的 RAM。该芯片使用的高性能 Cortex-M7 内核具有全套的 DSP 指令,能够快速高效的进行复杂的浮点数据运算和处理。这样强劲的运算能力可以满足系统对实时数据处理的需求。此外,STM32H7B0VBT6 还具有 2 个 16 位最高速度可达 3.6 MSPS 的 ADC、2 个 12 位 DAC 等丰富的模拟外设,可用于模拟数据采集和控制外部压控放大器。



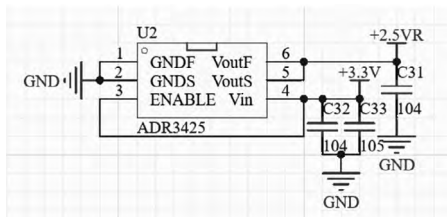


图3 ADR3425 基准电压电路

3.2 前置放大电路

用于 TDLAS 系统的光电探测器主要为 InGaAs 光电二极管,能够将光信号转化为电信号^[12]。当光电二极管接收到来自激光器的光信号后,会产生对应激光光强变化的微弱电流信号。这种微弱的电流信号不易测量,通常使用前置放大器将光电二极管产生的微弱电流信号转化为电压信号后再进行放大处理^[13]。

前置放大电路为跨阻放大电路,采用 FET 输入的运算放大器 OPA656。OPA656 具有 500 M 超高带宽,单位增益稳定,输入电压噪声低等特点。其输入偏置电流为 2 pA,在将 uA 级电流信号转化为电压信号时带来的误差极小。前置放大电路如图 4 所示,当光电二极管产生的电流为 100 μ A 时,输出电压为 0.2 V。要获得更大的放大倍数可以增大反馈电阻,但是增大反馈电阻会引入过多的噪声,因此电路增加了一级同相比例放大电路,将电压信号进一步的放大。

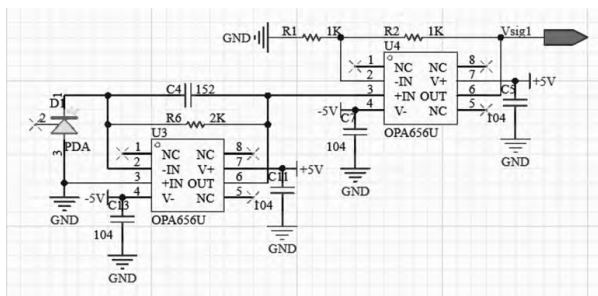


图4 OPA656 前置放大电路

3.2.2 压控放大电路

实现动态光强跟踪检测,不仅要实时的获取光强信息,而且要根据光强信息的变化及时调整检测电路的放大倍数,使用作光强检测的通道 2 的光电二极管的输出的电信号经过处理和放大后保持不变。通道 1 的放大电路的增益则和通道 2 成一定的比例,因此在调整通道 2 的放大器增益时同步的成比例调整通道 1 的增益。这样通道 1 输出的电压信号就能随光强的变化而实时变化,实现动态光强跟踪检测。

为实现放大电路的增益调节,系统选择了压控放大器 AD8367 对前置放大器放大的信号做进一步的处理。外部输入的模拟电压可以通过芯片的 GAIN 管脚线性的控制放大器的增益,此外还可以通过芯片的 MODE 管脚设置增益模式^[14]。通过手册可知,芯

片 GAIN 输入电压范围要在 0~1 V 之间,因此,设计了电阻网络,将单片机 0~2.5 V 的电压衰减到 0~1 V。压控放大电路如图 5 所示。

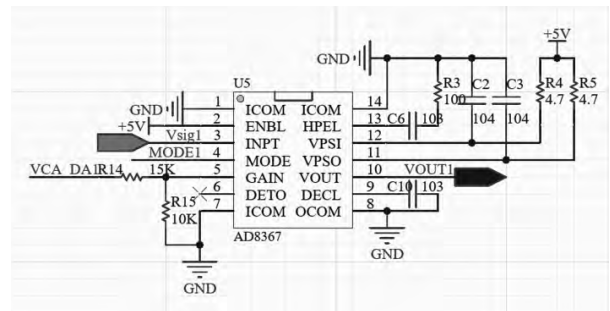


图5 压控放大电路

利用信号源产生一个峰峰值为 200 mV 的 10 KHz 正弦波信号当作压控放大器的输入信号。在 MODE 为高电平时,单片机 DAC 输出电压 0.75 V 时,输出信号被放大约 10 倍;在 MODE 为低电平时,单片机输出电压不变,输出信号衰减约 10 倍。结果证明设计的压控放大器能够在单片机控制下改变电压信号的增益。

4 软件流程设计

为保证 TDLAS 系统光电探测电路最终输出的电压能随着光强的变化自适应调整,实现动态光强跟踪,在主控制器上编写了的控制程序。控制程序中使用离散点积分的算法获取光强变化情况,并根据光强变化调整放大器的增益。系统的控制程序流程图如图 6 所示。

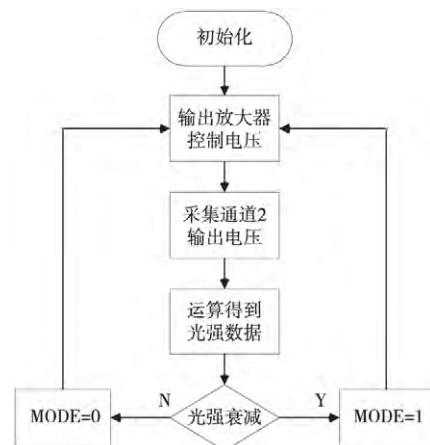


图6 控制程序流程图(过于简单,有点创新的东西)

系统上电后,首先进行初始化,开启单片机的 ADC 和 DAC 模拟外设。先将压控放大器的放大倍数设置为 1,使用 ADC 以 1 ms 的时间间隔采集 1 000 次通道 2 的输出电压,利用采集到的数据获得信号的周期。再使用 ADC 以 100 μ s 的时间间隔采集一个周期通道 2 的电压,将电压值相加可以得到一个与光强相关的数据,在本文中称之为光强数据。随后将这个数

据与系统预设的数据进行比较,光强衰减,令 $MODE=1$ 控制压控放大器处于正斜率增益模式;当光强变大时,令 $MODE=0$ 控制压控放大器处于负斜率增益模式。并调整 DAC 的输出电压,对电路的增益进行控制,最终将参考通道的输出电压调整到目标值,并以此成比例的调整测量路的增益,从而抵消了激光器光强变化对输出电压的影响,实现动态光强跟踪检测。

4 实验与测试结果

为了验证电路的动态光强跟踪的功能和效果,使用 DFB 激光器搭建了测试系统对电路进行实验。

根据 TDLAS 气体检测系统的实际应用需求,利用信号源产生 10 Hz 锯齿波和 10 kHz 的正弦波叠加的电压信号,然后将其转换为电流信号驱动激光器。本实验中利用驱动电压信号中正弦波的峰峰值变化来模拟光强的衰减。

激光先经过分光器分成两束光,一束光用于通道 1 的气体检测,另一束光直接耦合到探测器上,用于监测激光器光强。上电后,调整激光器的驱动信号,使激光器的光强发生改变。使用示波器对通道 1 输出的电压进行测量,读取输出信号中不同点正弦波信号的峰峰值,测量结果如下表所示。

表 1 测量数据

驱动信号	第一组	第二组	第三组
正弦波峰峰值	正弦波峰峰值	正弦波峰峰值	正弦波峰峰值
200 mV	282 mV	276 mV	290 mV
250 mV	280 mV	278 mV	280 mV
300 mV	281 mV	282 mV	282 mV
350 mV	278 mV	284 mV	284 mV
400 mV	291 mV	292 mV	289 mV
450 mV	287 mV	285 mV	284 mV

对上表实验数据进行分析,当激光器驱动信号发生明显变化时,检测电路输出的信号只有极其微弱的改变,这种变化可能是由于测量噪声或者系统不断对压控放大器的增益进行调整造成的。由于变化过于微弱,对系统最终测量精度的影响可以忽略。经过实验可知,检测电路在激光器光强改变的情况下,输出的电压基本保持不变,实现了电路的动态光强跟踪。

5 结论

本文针对应用于极端环境的气体测量的 TDLAS 系统由于激光器的光强的变化造成系统的测量误差,研制了动态光强跟踪检测电路,通过对探测器的信号进行转化和处理从而消除激光器光强变化对气体检测系统的影响。电路使用 OPA656 将电流信号转化为电压信号并进行放大,然后通过 STM32H7B0VBT6 控制压控放大器 AD8367 对信号进行进一步的程控放大,并根据采集到的信号实时调整压控放大器的增

益,实现了检测电路的光强动态跟踪。经过实验,该电路针对激光器光强变化可以快速、准确调整增益,为下一步信号处理提供稳定的电压信号。本文设计的检测电路提高了系统的环境适应性,增强了 TDLAS 气体检测系统在极端环境下的工作的稳定性。

参考文献

- [1] 聂伟, 阚瑞峰, 杨晨光, 陈兵, 许振宇, 刘文清. 可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展[J]. 中国激光, 2018, 45(09): 9-29.
- [2] 梁运涛, 田富超, 冯文彬, 邵振鲁, 孟祥宁, 陈成锋. 我国煤矿气体检测技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(06): 1701-1714.
- [3] Xuanbing Qiu, Yongbo Wei, Jie Li, Enhua Zhang, Ning Li, Chuanliang Li, Jilin Wei. Early detection system for coal spontaneous combustion by laser dual-species sensor of CO and CH₄ [J]. Optics and Laser Technology, 2020, 121: 105832.
- [4] 陈晨, 王彪. 红外气体传感技术综述[J]. 激光杂志, 2019, 40(02): 1-5.
- [5] Deng Botao, Sima Chaotan, Xiao Yangfan, Wang Xuefang, Ai Yan, Li Tailin, Lu Ping, Liu Deming. Modified laser scanning technique in wavelength modulation spectroscopy for advanced TDLAS gas sensing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 151.
- [6] 熊佳慧, 卜雄洙, 杨昊青, 宋扬. TDLAS 气体浓度检测中 DFB 激光器驱动及温控电路设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(09): 161-165.
- [7] Li Bin, Xue Liang, Ji Nan, Wei Da Hui, Tlidi Mustapha. Research on Spectroscopy Modulation of a Distributed Feedback Laser Diode Based on the TDLAS Technique [J]. International Journal of Optics, 2021, 98-102.
- [8] 陆丹, 杨秋露, 王皓, 贺一鸣, 齐合飞, 王欢, 赵玲娟, 王圩. 通信波段半导体分布反馈激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(07): 11-29.
- [9] 赵建宜, 陈鑫, 周宁, 曹明德, 黄晓东, 刘文. 纳米压印工艺制作 DFB 激光器的可靠性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(02): 56-62.
- [10] 陈越, 王彪, 鹿洪飞, 杨凯, 陈垒, 张国军, 范兴龙. 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.
- [11] 王燕, 张锐. 光电探测器特性在 TDLAS 气体检测中的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(02): 288-294.
- [12] 黄建华, 吴光, 曾和平. 基于 1.5GHz 多次谐波超短脉冲门控 InGaAs/InP 雪崩光电二极管的近红外单光子探测技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(02): 29-33.
- [13] 戴童欣, 王彪, 连厚泉, 黄硕, 程林祥, 俞泳波. 用于 TDLAS 二氧化碳检测系统的光电探测电路设计[J]. 激光杂志, 2021, 42(04): 41-45.
- [14] 周进, 申伯纯, 王雪宝. 基于 AD8367 的某监测设备自动增益控制模块设计与测试[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(04): 167-171.