

• 极端环境光学与应用 •

基于 XC6SLX16 的 TDLAS 气体检测激光驱动系统

王 彪¹ 俞泳波^{1 3} 薛金波^{1 2} 张 瑞^{1 2} 程林祥^{1 2}

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 技术作为一种快速、准确、高精度的气体检测手段, 可用于多种极端环境中的气体测量以及人体呼气检测等领域。本文设计了一种基于 XC6SLX16 的 TDLAS 气体检测激光驱动系统, 采用 FPGA 芯片 XC6SLX16 为主控, 在 FPGA 内部利用直接数字合成的方式产生激光器所需要的驱动信号。并研制了输出范围数控可调的压控恒流源电路, 可以通过 FPGA 设置不同档位的电流输出, 使得驱动系统可以满足不同激光器的需求。同时, 系统使用 USB 的方式进行通信, 通过上位机配置系统工作时的各项参数, 提高了系统的易用性和灵活性。

关键词: XC6SLX16; TDLAS; 激光驱动; 呼气检测

中图分类号: TN271.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.14016/j.cnki.jgzz.2022.11.011

TDLAS gas detection laser drive system based on XC6SLX16

WANG Biao¹, YU Yongbo^{1 3}, XUE Jinbo^{1 2}, ZHANG Rui^{1 2}, CHENG Linxiang^{1 2}

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: As a fast, accurate and high-precision gas detection method, TDLAS technology can be used for gas measurement in a variety of extreme environments and human breath detection. In this paper, a TDLAS gas detection laser driving system based on XC6SLX16 is designed. The FPGA chip XC6SLX16 is used as the main control, and the driving signal required by the laser is generated by direct digital synthesis in the FPGA. And developed a voltage-controlled constant current source circuit with digitally adjustable output range, which can set the current output of different gears through FPGA, so that the drive system can meet the needs of different lasers. At the same time, the system uses USB to communicate, and configures various parameters of the system through the host computer, which improves the usability and flexibility of the system.

Key words: XC6SLX16; TDLAS; laser drive; breath detection

1 引言

近年来, 我国逐步加大了对极端环境探测的研究

力度, 对极端环境的探测集中在深海、深空、极地等领域。由于极端环境的工况比较恶劣, 故一些科研活动所需要的仪器设备可能无法稳定工作。TDLAS 作为一种利用气体的光谱吸收原理进行气体探测的技术, 由于其操作简单、可靠性高等优点^[1-2], 在极端环境的气体探测领域能够发挥重要作用。此外, TDLAS 气体检测系统以其操作简单、检测成本低等特点, 也可应用于人体呼气检测系统、工业生产等场景^[3]。

收稿日期: 2022-08-21

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)、吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金项目(No.2021SYHZ0012)

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>

TDLAS 气体检测系统采用波长调制技术,需要对激光器输出的激光波长进行调制^[4-5]。通常使用调制激光器电流的方式实现波形调制^[6],本文设计了可调谐激光器驱动系统,以 FPGA 作为主控,通过上位机控制,能够实现激光器驱动的调制波形输出和输出电流档位切换。

2 系统总体方案

TDLAS 检测系统使用可调谐半导体激光器作为光源,利用激光被气体吸收形成的吸收光谱进行气体种类和浓度的检测。为了提高系统检测下限,该技术需要对激光器射出的激光进行调制,调制的波形为低频三角波或锯齿波信号叠加上高频的正弦波信号^[7-8]。

系统主要由主控电路、DAC 电路、压控恒流源电路和上位机通信电路组成。其中主控电路使用 FPGA 作为主控制器,在其内部实现了直接频率合成器并通过 DAC 产生相应频率的调制电压信号,再经过压控恒流源电路将电压信号转换为电流信号驱动激光器。其中,压控恒流源电路中增加了可变增益的反馈放大电路,可以通过主控修改数字电位器的阻值实现放大倍数的切换,从而切换输出电流的档位,使得该系统可以适用于不同的激光器。系统通过串口转 USB HID 的方式与 PC 通信,通过上位机软件配置系统的输出波形和电流档位等参数。

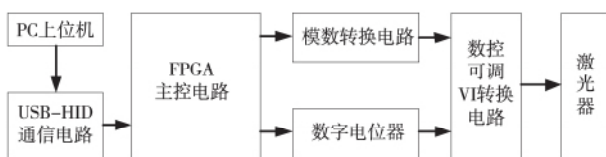


图1 系统总体框图

3 硬件电路设计

3.1 主控电路设计

在 TDLAS 检测系统中,需要根据不同的情况产生不同的激光器调制信号,此外还需要进行电流档位的切换,故驱动系统使用 XC6SLX16 作为主控芯片。XC6SLX16 为赛灵思的 FPGA 芯片,内部具有 14 579 个逻辑单元,32 个 DSP 处理单元,576 kbit 的嵌入式存储器等丰富的逻辑资源,满足激光器驱动调制波形产生和通信控制等逻辑功能实现的需要^[9]。

主控电路部分如图 2 所示,除了 XC6SLX16 主控

芯片以外,主控电路还包含 50 MHz 有源晶振,串行 SPI 配置芯片、电源芯片和 HID 转串口芯片。其中 HID 转串口芯片可以实现上位机和 FPGA 的通信,上位机可以通过软件对系统的参数进行配置,从而控制系统输出相应的电流信号。

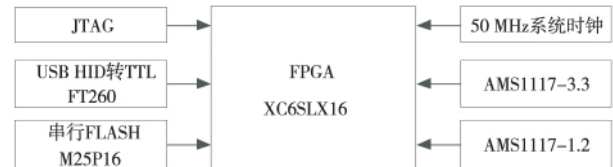


图2 主控系统框图

3.2 数模转换电路设计

TDLAS 气体检测激光驱动系统的驱动电压信号由扫描信号和调制信号叠加产生。一般采用两个信号发生模块分别产生上述两个信号,再使用同向加法电路进行信号叠加^[10]。这种方式需要两路信号发生电路和一路信号叠加电路。本系统在 FPGA 内部实现了低频扫描信号和高频正弦波信号的叠加,与常规的使用双路 DAC 产生信号并采用模拟运放电路进行叠加产生调制信号的方式相比,使用单路 DAC 即可实现驱动信号产生的功能^[11]。降低了系统的复杂度,提高了工作的稳定性^[12]。系统采用 MAX541 数模转换芯片产生调制电压信号。MAX541 是一款 MAXIM 公司生产的 16 位高精度 DAC 芯片,其建立时间为 1 μ s、INL 为 1 LSB,同时搭配使用温漂为 2 ppm/ $^{\circ}$ C、输出噪声为 1 μ V_{pp} 的超低噪声、高精度基准电压源 ADR4533B,满足了系统对数模转换电路速度和精度的要求。模数转换电路如图 3 所示。

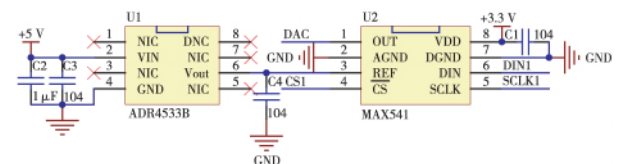


图3 模数转换电路设计

3.3 压控恒流源电路设计

常用于 TDLAS 检测系统的激光器为可调谐半导体激光器。激光器的出光波长和光功率会直接影响到整个气体检测系统的检测精度和稳定度,而波长和光功率会直接受激光器的驱动电流的影响^[11-12]。

如图 4 所示,本系统的压控恒流源电路由运算放大器、MOSFET、低温飘采样电阻、仪表放大器和数字电位器组成。运放采用德州仪器的 OPA325,相比于

传统的采用互补轨到轨输入级运放,OPA325采用零交越失真电路拓扑结构,保证了电路工作范围内的高线性度。

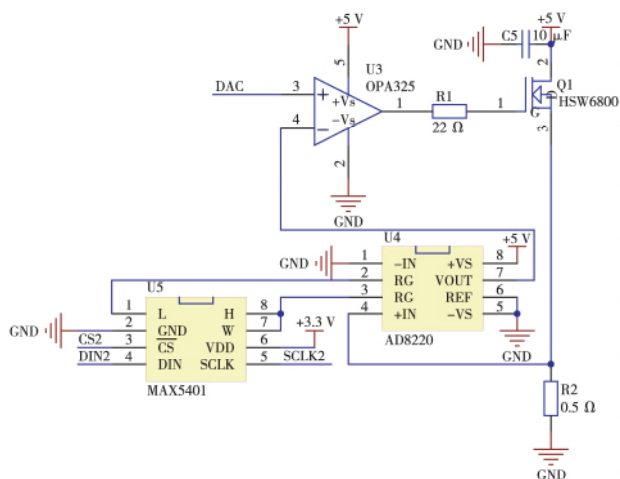


图4 压控恒流源电路

压控恒流源电流一般采用直接反馈的方式,本系统的恒流源电路使用仪表放大器放大反馈信号,并且搭配数字电位器实现程控放大。数控放大电路如图中所示,仪表放大器将采样电阻两端的电压放大后输入到运放的反馈端,反馈量的大小和电流大小成比例。FPGA主控通过调整数字电位器的电阻值来切换仪表放大器的放大倍数,从而切换输入电流的档位^[13]。

压控恒流源的电流采样电阻使用 0.5Ω 的高精度低温飘电阻,该电阻随着电流变化温度和阻值变化很小,保证了电路工作时电流的稳定性。仪表放大器采用AD8022,该放大器具有 $1\sim 1\,000$ 倍可调增益,且带宽最大为 1.5 MHz 。电路使用256抽头低温飘数字电位器MAX5401,当FPGA控制MAX5401的阻值变化时,仪表放大器的增益改变,增益公式如下:

$$R_c = \frac{49.4\text{ k}\Omega}{G-1} \quad (1)$$

其中 R_c 为数字电位器阻值, G 为仪表放大器增益倍数。

4 控制软件和上位机设计

4.1 FPGA 控制程序

系统FPGA部分的软件设计主要分为三个模块,分别是:调制信号产生模块、输出电流档位控制模块、串口上位机通信模块。如图5所示。

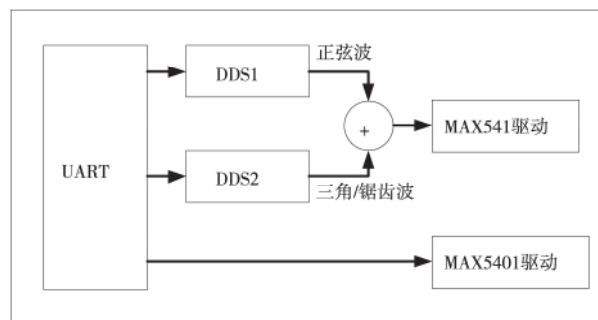


图5 FPGA 控制程序框图

调制信号产生模块由DDS模块、信号叠加模块和MAX541驱动模块组成。由两个DDS模块分别产生高频调制信号和低频扫描信号。产生的扫描信号和调制信号直接在FPGA中进行叠加,叠加后的信号再通过DAC驱动模块进行输出,产生驱动电压信号。由于信号产生模块的核心部分在FPGA内部实现,故可以灵活的改变产生信号的频率和幅值,以满足不同场景和不同激光器对调制信号的要求。

输出电流档位控制模块用于控制数字电位器的电阻值,从而实现控制输出电流的最大范围。串口上位机通信模块则是通过USB转串口芯片接收到来自上位机的数据包,并对数据包进行解析,提取出所需要的系统控制信息,如:输出电流档位、输出波形频率、幅值等。

4.2 上位机软件设计

为了增加系统使用的灵活性和便捷性,使用Visual Studio设计了上位机。系统通过串口转标准USB HID设备芯片FT260进行通信。驱动系统和上位机连接成功后,在上位机界面可以设置调制波形和扫描波形的频率和幅值、输出电流范围、波形输出使能等参数。设置完成后,上位机通过USB接口下发数据,FPGA接收到数据并解析后更改系统工作状态。上位机软件界面如图6所示。



图6 上位机界面

5 实验与测试结果

可调谐激光器驱动系统支持多种驱动波形输出和多档位电流输出,因此分别对不同档位的直流电流输出特性和交流输出的频率和幅值特性进行了测试。

驱动电路支持多档电流输出: 20 mA、50 mA、100 mA、200 mA、300 mA。针对这五个档位,在每个档位选取满量程的 50% 的电流进行输出,分别测量其实际电流大小和电流波动情况,如下表 1 所示。

表 1 激光器驱动电路电流波动情况

档位(mA)	设定驱动电流(mA)	实测电流(mA)	电流波动(%)
20	10	9.997	0.05
50	25	24.999	0.03
100	50	49.984	0.05
200	100	100.010	0.04
300	150	149.995	0.03

根据表 1 可知,在不同档位下,电流的波动大小均小于 0.05%。稳定度良好,保证了 TDLAS 系统的激光器能够稳定工作。

交流输出测试主要对 DAC 输出电压信号的频率和峰峰值进行测量,此部分包括扫描信号和正弦调制信号,测量结果如下表。

表 2 交流输出测试

设定幅值/V	设定频率/kHz	实测幅值/V	实测频率/kHz
0.5	5	0.51	4.999
1	7.5	1.02	9.998
1.5	10	1.49	10.001
2	15	1.97	15.002
2.5	20	2.50	19.999

由上表可知,系统产生的信号与设定值误差较小,能够满足 TDLAS 系统对可调谐激光器驱动的需求^[14]。

6 结论

设计了一种基于 FPGA 的输出电流档位可变的 TDLAS 气体检测激光驱动系统。使用 XC6SLX16 为主控,在内部构建了调制信号发生模块,使用高精度 DAC 进行信号输出。同时在压控恒流源电路部分增加了数控放大电路,使系统具有电流输出多档可调功能,能够适应不同类型的激光器,增加了系统应用的

灵活性。本设计还可以通过上位机进行参数配置,具有工作状态稳定、输出波形和电流范围灵活可变的特性,可广泛应用于气体检测系统的激光器驱动中。

参考文献

- [1] 姜治深,王飞,许婷,等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的甲烷遥测方法的研究[J]. 能源工程, 2012(3): 1-5.
- [2] 邓文平,俞大海,李鹰,等. 激光在线气体分析仪的应用[J]. 石油化工自动化, 2012, 48(2): 60-65.
- [3] 王鑫,荆聪蕊,侯凯旋,等. 基于 TDLAS 技术的人体呼气末 CO₂ 在线检测[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 290-296.
- [4] MINGYUAN XIN, JUNLING SONG, WEI RAO, et al. An efficient regulation approach for tomographic reconstruction in combustion diagnostics based on TDLAS method[J]. Optics Express, 2014, 22(23): 28567-28571.
- [5] 李哲,张志荣,孙鹏帅,等. 利用 TDLAS 技术的多点甲烷气体全量程监测[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 235-241.
- [6] MICHIMIRO UCHIUMI, NILESH J. VASA, MAKOTO FUJIWARA, et al. Development of DIAL for CO₂ and CH₄ in the atmosphere[C]//Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III. 2002: 141-149.
- [7] 李奥奇,王彪,许玥,等. 用于 CH₄ 气体 TDLAS 检测系统的信号发生电路研制[J]. 激光杂志, 2019, 40(12): 6-9.
- [8] 段尚汝,谈曾巧,王琦,等. 基于 TDLAS 的激光甲烷检测系统的研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(1): 101-104.
- [9] 黄惠琳,陆小飞,杨羽佳,等. 一种可调节低噪声恒流源电路[J]. 现代电子技术, 2022, 45(2): 16-20.
- [10] 王彪,鹿洪飞,李奥奇,等. 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(6): 40-43.
- [11] 杨涛,李武森,陈文建. 新型小功率半导体激光器驱动及温控电路设计[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(2): 136-143.
- [12] 熊佳慧,卜雄洙,杨昊青,等. 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(9): 161-165.
- [13] 王飞虎,胡朝晖,刘全普,等. SERF 原子磁强计用半导体激光器驱动系统[J]. 激光杂志, 2020, 41(3): 52-58.
- [14] 方立德,徐潇潇,赵计勋,等. 恒流源对近红外光谱传感器测量不确定度的影响[J]. 计量学报, 2022, 43(3): 370-377.