

## 基于 STM32H7A3 的频分复用型 TDLAS 激光驱动系统研制

王彪<sup>1</sup>, 吴剑星<sup>2</sup>, 吕婉溧<sup>2</sup>, 杨银春<sup>2</sup>, 廖辉<sup>2</sup>, 吴立彬<sup>2</sup>, 张瑞<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

<sup>2</sup>吉林大学, 长春 130015;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**随着气候变化问题日渐凸显, 习近平主席作出了碳达峰、碳中和的重要指示, 因此对二氧化碳检测的研究具有重要的意义。针对二氧化碳和水汽同时检测的需要, 本文设计了一种频分复用型 TDLAS 激光驱动系统。系统采用 STM32H7A3 作为主控器, 利用其内部高级定时器和多通道 DAC 产生多路幅值频率可调的电压信号, 搭配外部 V-I 转换电路和光纤合束器研制出频分复用型 TDLAS 激光驱动系统。系统配备 FLASH 存储芯片和对应的上位机软件, 具有灵活设置系统参数、存储加载控制数据并且在断电时保护数据不丢失的功能。经过测试, 该系统输出的电流信号波形稳定, 频率误差小, 可应用于 TDLAS 系统进行多个激光器的同时驱动。

**关键词:** TDLAS; 频分复用; 电流驱动; STM32H7A3

中图分类号: TN271.5 文献标识码: A doi: 10.14016/j.cnki.jgzz.2024.04.035

## Development of frequency division multiplexing TDLAS laser drive system based on STM32H7A3

WANG Biao<sup>1</sup>, WU Jianxing<sup>2</sup>, LYU Wanli<sup>2</sup>, YANG Yinchun<sup>2</sup>, LIAO Hui<sup>2</sup>, WU Libin<sup>2</sup>, ZHANG Rui<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

<sup>2</sup>Jilin University, Changchun 130015, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** As the problem of climate change is becoming more and more prominent, President Xi Jinping has made the important instruction of carbon peak and carbon neutral, so the research on carbon dioxide detection is of great significance. For the need of simultaneous detection of carbon dioxide and water vapor, this paper designs a frequency division multiplexing TDLAS laser drive system. The system adopts STM32H7A3 as the main controller, and uses its internal advanced timer and multi-channel DAC to generate multiple amplitude-frequency-adjustable voltage signals, which are matched with the external V-I conversion circuit and fiber optic combiner to develop the frequency division multiplexing TDLAS laser driving system. The system is equipped with a FLASH memory chip and corresponding host computer software, which has the functions of flexibly setting system parameters, storing and loading control data, and protecting the data from being lost in case of power failure. After testing, the output current signal waveform of the system is stable with low frequency error, which can be applied to TDLAS system to drive multiple lasers at the same time.

**Key words:** TDLAS; frequency division multiplexing; current drive; STM32H7A3

收稿日期: 2023-10-15

基金项目: 吉林省科技发展计划重点科技研发项目 (No. 20220203016SF)、中国科学院大学生创新实践训练计划项目 (No. 2022008090)

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>

## 1 引言

随着全球气候变暖,各国愈发重视环境保护问题,习近平主席在第七十五届联合国大会中提出了2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和的目标<sup>[1]</sup>。而二氧化碳和水汽智能检测仪器是实现“碳达峰”和“碳中和”的有效保障。因此,设计一款小型化系统来实现对二氧化碳和水汽的准确检测具有重要的研究意义。

现今已研究出多种气体浓度检测方法。其中,TDLAS技术,即可调谐半导体激光吸收光谱检测技术,通过使用分子吸收光谱的原理,可较容易地部署在小型仪器上进行检测,并且具有灵敏度高,实时性好的优点。TDLAS气体检测系统使用可调谐激光器产生特定波长的光信号,被待测气体吸收后会在对应的吸收峰处会产生吸收,利用光电传感器接收被吸收后的激光,可获得待测气体的浓度信息<sup>[2-4]</sup>。对于在近红外波段场景下应用的TDLAS检测系统,目前主要使用分布反馈式DFB激光器,其具有高功率、高效率以及良好的光束质量等优点,广泛应用于气体检测、通信、医疗等领域<sup>[5-6]</sup>。

要同时实现对两种气体浓度的检测,可以使用频分复用技术。其核心要点是传输的信号之间共享通信信道的可用带宽,每个信号占用公共带宽内的不同频段<sup>[7]</sup>。将不同频率的调制信号叠加在一起形成复合信号,即可实现单通道频分复用功能。使用频分复用技术可以充分利用信道的各个频带,在一定程度上提高信道的利用率,简化系统设计结构<sup>[8]</sup>。

对二氧化碳和水汽进行频分复用检测时,需要用到两路激光器分别对不同组分的混合气体进行检测,同时需要两路频率精准的调制信号对激光器进行电流驱动<sup>[9]</sup>。驱动电路作为检测系统的重要组成部分,其性能直接影响到激光器输出光信号的稳定性<sup>[10]</sup>。本文为了解决二氧化碳和水汽频分复用检测过程中两路激光器的驱动问题,设计了一种基于STM32H7A3的频分复用型TDLAS激光驱动系统。

## 2 系统整体设计

TDLAS系统基于光谱吸收原理,通过输入不同频率的电流信号可控制可调谐激光器输出特定波长的激光。当激光照射到待测气体时,与待测气体吸收峰

位相同的激光会被选择性吸收,吸收后的透射光强变化可通过光电探测器测量,再对测量得到的数据进行分析处理,即可求得气体的浓度<sup>[11]</sup>。其中,通过同时驱动多个不同波段的激光器可实现对多种气体的同时检测。本文设计一种同时对多个激光器精确控制的驱动技术,可应用于多种气体的频分复用检测。

系统整体设计如图1所示,分为STM32H7A3主控电路、V-I转换电路、光纤合束器、不同波段的DFB激光器、FLASH存储电路和上位机。首先,主控器STM32H7A3的高级定时器和DAC可产生精确的模拟电压信号,这一过程的输出参数可通过上位机精确调整,并由FLASH电路存储。之后,模拟电压信号经V-I电路转换可以得到两路调制电流信号,分别用于控制两个可调谐激光器;激光器输出两路不同频率的光信号,通过光纤合束器耦合后进入二氧化碳和水汽混合气室;最后,经过光电探测模块转换为电压信号显示在示波器上。

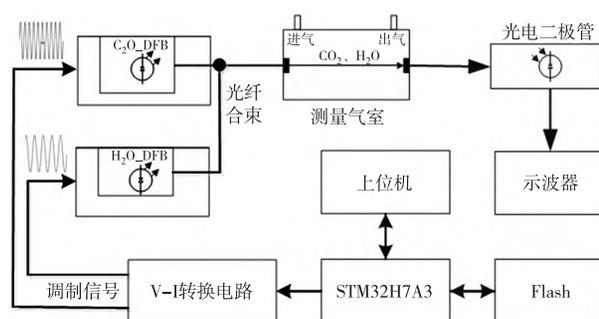


图1 系统整体框图

## 3 硬件电路设计

### 3.1 主控电路

由于频分复用型TDLAS激光驱动系统的激光器调制信号需要使用高速DAC进行电压输出,因此本设计采用意法半导体公司STM32H7A3RGT6作为主控器,其是一款基于ARM Cortex-M7内核的高性能MCU,具有双精度浮点单元,工作频率高达280 MHz。从闪存执行程序时,可以利用其L1缓存并实现零等待执行<sup>[12-13]</sup>。此外,任务也有实时性的要求,本主控器包含高级定时器,2个12位的DAC和DMA,可以用来传输需要转换的数据,从而释放CPU处理其他任务。通过配置DMA的传输地址和传输数量,可以实现连续的数据传输,保证DAC输出的连续性。其强大的运算能力和丰富的功能,可以满足本系统的设计需求<sup>[14]</sup>,其主控原理图如图2。

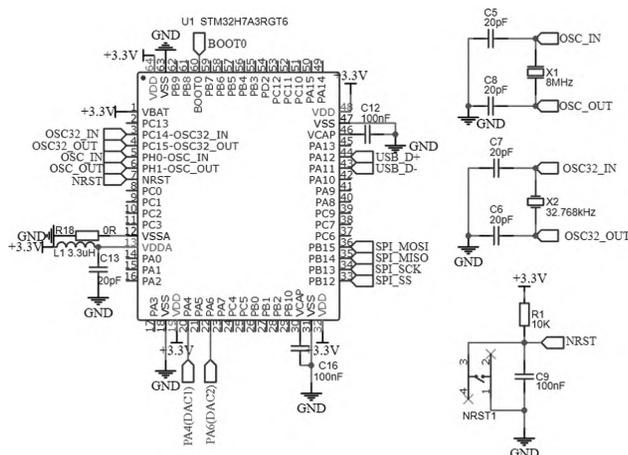


图2 STM32H7A3 主控制器电路

为提高整体控制精度,一个稳定的电压基准是必不可少的,主控制器内部电压性能有限,故使用外部电压基准作为 DAC 参考电压。本系统采用低压差稳压器级联一个电压基准作为 DAC 的电压参考。先采用 LT3045 降压至 3.52V,再通过高性能基准电压源 REF3033 得到稳定的 3.3V 参考电压。REF3033 稳压电路基于三端稳压器的原理,使得输出电压 3.3V 更为稳定,最终 RMS 噪声指标小于  $0.8\mu\text{VRMS}$ ,提升了系统整体的稳定性<sup>[15]</sup>。

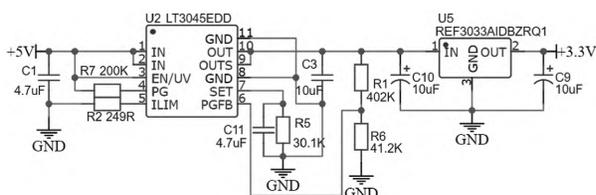


图3 基准源电路图

### 3.2 频分复用

为实现单一气室对多组分气体的同时检测,本系统采用频分复用的方式进行气体检测,其需要调制不同的载波频率。为此,我们采用了多路高速 DAC 并行工作的策略,每一路 DAC 负责生成一个特定频率的信号,通过 2 个 DAC 的同时工作,得到双路不同频率的驱动电压。此外计算  $\sin x$  的频率和幅值,通常需要进行复杂的浮点计算,为了提高处理速度,可以预先计算出一系列  $\sin x$  的量化值,并将这些值存储在数字码表中。当需要某个值时,只需要根据输入的  $x$  值查找对应的表格,即可得到  $\sin x$  的近似值。另外为了提高系统的处理速度, DAC 的输入信号都是通过 DMA 直接对内存中的存储地址进行直接访问,不需要 CPU 进行数据调度。这种直接访问方式不仅减少了数据处理的延迟,还降低了 CPU 的负担。通过上

述方式,可以成功实现对不同频率信号的调制,提高系统的处理速度。程序整体流程如图 4 所示。

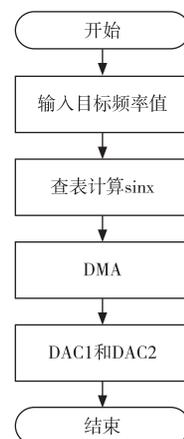


图4 频分复用流程图

### 3.3 V-I 转换电路

在本系统中扫描信号是由 STM32H7A3 主控制器芯片的 DAC 模块发出的。此时得到的信号是电压信号,而激光器是由电流进行驱动,因此需要设计 V-I 转换电路,将 DAC 输出的电压转换为电流来控制激光器。如图 5 所示,以其中一路信号为例,扫描信号由 PA4 (DAC1) 产生,输入到运放 LM358 同向输入端,其输出端电压极性为正,进而晶体管 S8050 导通,工作在放大区。当晶体管输出电流增大时会使运放反向输入端电压升高,从而运放的正负电压差减小,使得输出电流减小,最终达到平衡,输出稳定的电流信号。本系统所设计的 V-I 转换电路的输出电流范围为 0-150 mA,频率响应为 10 kHz,其可满足激光器稳定工作的需求。

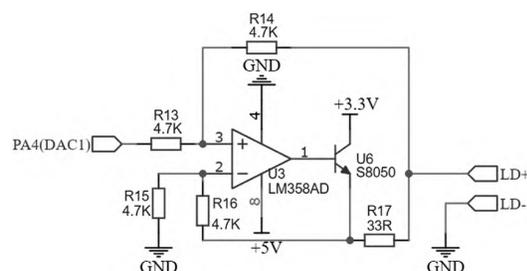


图5 V-I 转换电路图

### 3.4 存储电路

系统运行时,上位机设置的驱动参数可由用户自定义,因此需要一个存储电路记录更改后的数据。本电路使用 FM25CL64 进行存储,其是一款 64 K 位的非易失性铁电随机存储器,结构容量为  $8192 \times 8$  位。该存储器使用 SPI 接口双向传输数据,其总线速度最

大可达到 20 Mbps,数据保存时间长达 45 年,可以满足系统长时间运行需要。其内部工作的结构框图如图 6 所示:

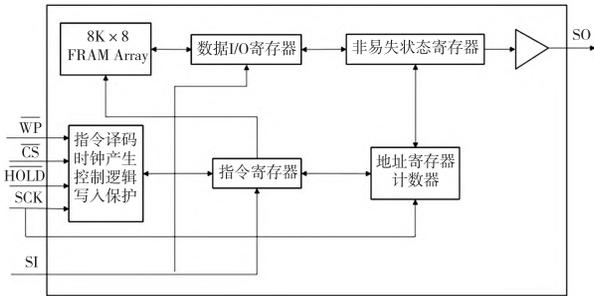


图 6 存储器内部结构图

该存储器的 0x0000~0x000B 地址依次用于存放一路 DAC 的正弦波频率、正弦波幅值、基波初值、基波末值、基波频率和波形参数,每一个数据占用 2 个字节。同样地,将另一路 DAC 的相应参数存放在地址为 0x000C~0x0017 的区域中。对参数进行修改后,MCU 会将相应地址所在的数据进行覆盖。每次系统开机时,主控器会读取存储器 0x0000~0x0017 地址中的数据,并作为系统的初始化参数,使系统能够保持以实验中所获得的更优参数运行。

#### 4 上位机软件

为提高所设计的 TDLAS 系统的使用灵活性,设计了上位机操控软件,其可以灵活设定所需的各项参数,以实现 DDS 信号的输出控制<sup>[16]</sup>。

软件界面如图 7 所示。



图 7 上位机界面图

DDS 功能设置包括正弦波频率、正弦波幅值、基波初值、基波末值、基波频率、波形切换、输出使能。根据实验要求不同,可灵活设置具体数值,ARM 端会将设置好的参数存放在外部 FLASH 中,系统初始化时可自动装载,两路驱动电流可单独设置。

串口通讯数据数据包协议格式如表 1。

表 1 数据包协议格式

起始标志	1 字节
命令字	1 字节
数据位	2 字节
校验和	1 字节
结束标志	1 字节

此软件在实验过程中运行稳定,为系统参数设置提供方便快捷的控制操作。

#### 5 实验结果

为了验证输出电流信号的准确性,使用所设计的驱动电路和 DFB 激光器共同搭建了完整的系统对所设计的电路进行测试。

为了满足驱动可调谐激光器的实际应用需要,实验选取了 1~10 kHz 的频率范围,以 1 kHz 为步进进行调制信号输出,采用频率计进行了十组输出信号数据的测试实验,测得了不同输入频率参数下的实际信号频率,并分析得到系统误差,结果如表 2 所示。

表 2 实验数据与误差

设定信号频率	实测信号频率	绝对误差
1 kHz	1.001 kHz	0.10%
2 kHz	2.003 kHz	0.15%
3 kHz	3.005 kHz	0.17%
4 kHz	4.008 kHz	0.20%
5 kHz	5.012 kHz	0.24%
6 kHz	6.015 kHz	0.25%
7 kHz	7.019 kHz	0.27%
8 kHz	8.025 kHz	0.31%
9 kHz	9.033 kHz	0.37%
10 kHz	10.045 kHz	0.45%

对上表的实验数据进行分析,当输入的设定信号频率在 1 kHz~10 kHz 范围内变化时,系统实际所检测到的频率误差在 0.5% 范围以内,由此可见,其整体性能良好,可以较好地满足气体检测场景中的信号驱动需求。

## 6 结论

TDLAS 技术在气体浓度检测方面具有重要应用价值,笔者在传统的气体浓度检测系统上结合频分复用原理,建立了基于 STM32H7A3 的频分复用型 TDLAS 激光驱动系统。该系统功能齐全,拥有较好的灵敏度与稳定性。经过实验测试,该系统整体运行良好,输出的波形稳定,频率准确,误差较小,在二氧化碳和水汽的频分复用检测应用当中可以很好的实现两路可调谐激光器的信号驱动。此外,所设计的频分复用型气体驱动系统具有很好的拓展性,同样适用于大气污染防治、化工生产监测等领域的激光驱动场景之中。

## 参考文献

- [1] 杨柳,董傲霜,刘峥. 某办公楼节能设计、负荷计算与能耗分析[J]. 科技创新与应用,2022,12(32):35-38.
- [2] 程万前,王彪. 用于 TDLAS 激光气体检测的程控信号发生器的研制[J]. 激光杂志,2014(7):77-79.
- [3] 徐刚灵. 半导体激光器控制及 TDLAS 数据采集系统的软件设计[D]. 江苏:东南大学,2012.
- [4] Choi D W, Jeon M G, Cho G R, et al. Performance improvements in temperature reconstructions of 2-D tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS)[J]. Journal of Thermal Science, 2016, 25(1):84-89.
- [5] Hanse J P, Schmidt W A. A fast risetime avalanche transistor pulse generator for driving injection lasers[J]. Proc. IEEE, 1967,55(2):216-217.
- [6] 高彦伟,张玉钧,刘海秋,马慧敏. 半导体驱动激光电路设计及实验研究[J]. 量子电子学报,2023.40(5):98-104.
- [7] Tsonev D, Haas H. Avoiding spectral efficiency loss in unipolar OFDM for optical wireless communication[C]// Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communications, IEEE, 2014: 3336-3341.
- [8] 张作君,郎宏山,陈东风. 中远距离信号通信系统改造—HRPT/MPT 接收分系统 ACU 信号传输改造[Z]. 国家卫星气象中心,2011,04,01.
- [9] 刘颖杰. 动态信号分析仪的硬件设计[D]. 成都:电子科技大学,2014.
- [10] 张菊. 基于 DSP 的电力信号采集处理板的研究[D]. 北京:华北电力大学,2005.
- [11] 来晓帅. 单相 2kW 光伏并网逆变器及其信息管理系统设计[D]. 山东:山东科技大学,2015.
- [12] 龚玉锋. 新型推进技术研究及无人机控制技术[D]. 浙江:浙江工业大学,2020.
- [13] 陈政宇. 单片机发展现状与前景浅析[J]. 2015(11):105-111.
- [14] 贺政. 基于 FPGA 的多轴运动控制系统的研究[D]. 广东:广东工业大学,2020.
- [15] 黄月娥. 宽输入输出超低静态电流高 PSRR LDO 的设计研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
- [16] 杨元敏. 基于自主虚拟化平台的虚拟机迁移的研究和实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2015.