·光电测量与检测·

用于单光路 TDLAS 气体检测的激光器降噪驱动系统设计

王 彪[1],陈 越[1,2],黄 硕[1,2],戴童欣[1,3],连厚泉[1,3],许 玥[1,3],李奥奇[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: 为了去除单光路 TDLAS 气体检测系统中环境背景和系统本身的噪声干扰,提高系统检测精度,提出了一种激光器降噪驱动方案,并完成了激光器驱动系统设计。选定乙炔气体作为检测对象,首先构建激光器驱动模型,通过时分复用的方式将一路检测激光分为检测段和参考段,结合乙炔气体检测时对检测激光波长的需求给出具体的激光器驱动参数。然后阐述针对该激光器驱动模型的数据处理算法。最后进行电路设计,电路部分首先由主控器控制信号发生单元分别产生所需要的低频信号和高频信号,之后经过信号叠加单元和电压电流转换单元生成激光器驱动信号。经实验测试,结果表明将该激光器驱动系统应用于单光路 TDLAS 气体检测中能够在一定程度上提高系统检测精度。

关键词: TDLAS; 单光路气体检测; 乙炔; 激光器驱动

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI 编码:** 10. 14016/j.cnki.jgzz. 2019. 07. 010

Design of laser noise reduction drive system for single optical path TDLAS gas detection

WANG Biao[1],CHEN Yue[1,2],HUANG Shuo[1,2],DAI Tongxin[1,3], LIAN Houquan[1,3],XU Yue[1,3],LI Aoqi[1,3]

(1.Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, ChineseAcademy of Sciences, Changchun 130033,China;
2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3.University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to remove the noise in the single-optical TDLAS gas detection system, and improve the detection accuracy of the system, a laser noise reduction driving scheme is proposed, and the laser driving system design is completed. The acetylene gas is selected as the detection object. Firstly, the laser driving model is constructed. The detection laser is divided into the detectionand the reference segments by time division multiplexing. Combined with the acetylene gas detection, the specific laser driving parameters are given for the requirement of detecting the laser wavelength. A data processing algorithm for the laser driven model is then set forth. Finally, the circuit design is performed. The circuit part firstly generates the required low frequency signal and high frequency signal by the main controller control signal generating units, and then generates the laser driving signal through the signal superimposing unit and the voltage-current converting unit. The experimental results show that the laser drive system can improve the system detection accuracy to some extent in the single-optical TDLAS gas detection.

Key words: TDLAS; single path detection; acetylene; laser drive circuit

1 引言

近些年来,由于 TDLAS(可调谐半导体激光吸收光谱) 技术的高选择性、强稳定性和快响应速度等优点被广泛应用于气体检测领域[1-5]。为了适应多种环境下对气体检测精度的需求,通常利用双光路的检测方法,即一路激光通过充入待测气体的检测气室,另一路激光通过未充入待测气体的参考气室,最后经过差分处理的手段去除背景环境和检测系统本身的噪声干扰[6-8]。利用双光路的检测方法可以有效提高气体检测系统的检测精度,但是增加的一路参考光束相应需要增加一组光电检测模块和气室,这在一定程度上造成了资源浪费,系统成本增加并阻碍检测系统朝向小型化的方向发展。采用单光路的检测方法,将激光直接穿过充入待测气体的气室,后续对检测信号采集和处理。单光路 TDLAS 气体检测系统具有检测结

收稿日期: 2019-03-06
基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(No.2017YFB0405303)
作者简介: 王彪(1981-) ,男,博士,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

构简单的特点[9-10],但是外界环境的轻微扰动以及检测系统自身的微弱噪声均会对检测结果造成影响。为了解决该问题,提出了一种用于提高单光路 TDLAS 气体检测系统检测精度的激光器降噪驱动方案,以化工生产中常用的乙炔气体作为检测对象[11],设计具体的激光器驱动模型并给出参数。最后完成激光器驱动系统的设计。结果表明,所设计的激光器驱动系统应用于实际的单光路 TDLAS 气体检测中能够在一定程度上提高检测精度。

2　激光器驱动设计

2.1 激光器驱动信号模型

由 HITRAN 数据库查找乙炔红外气体吸收谱线,选定 1 520 nm 作为乙炔气体检测的吸收波长[12],基于此选择 Nanoplus 公司生产的 DFB 激光器作为乙炔气体检测系统的检测光源[13]。该激光器输出波长曲线如图 1 所示。

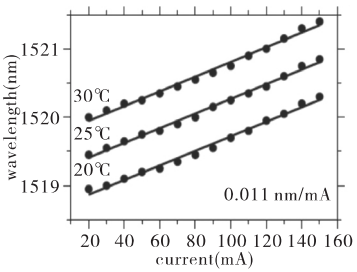


图 1　激光器输出波长曲线图

在实际乙炔检测时控制激光器工作在 25℃恒温条件下,通过改变激光器驱动电流的方式调整激光器输出波长,使激光器输出波长覆盖本系统所选的 1 520 nm乙炔气体红外吸收峰以满足乙炔气体检测系统对光源的需求。

目前可查阅的基于 TDLAS 技术检测气体浓度的系统中,激光器驱动部分用于调谐激光器输出波长的低频信号多为锯齿波或三角波[14-18],本论文以类梯形波代替锯齿波和三角波,针对选定的乙炔气体的1 520 nm红外吸收波长设计了激光器驱动模型,并确定了类梯形波的波形参数,激光器驱动信号示意图如下所示:

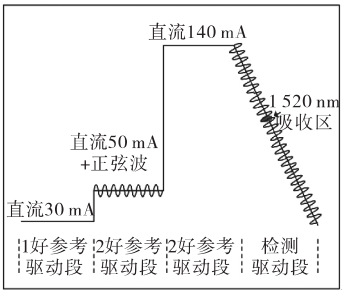


图 2　激光器驱动信号示意图

本方案采用时分复用的方式将一路激光器驱动信号分为一段检测驱动段和三段参考驱动段。如上图所示,1 号参考驱动段为 30 mA 的直流信号,2 号参考驱动段为 50 mA 直流信号和高频信号波的叠加,3 号参考驱动段为 140 mA 的直流信号,检测驱

动段为 140 mA 到 30 mA 随时间均匀减小的电流信号和高频正弦波信号的叠加。其中,2 号参考驱动段和检测驱动段叠加高频正弦信号的目的是将激光器驱动信号的频谱由低频段搬移至高频段,在气体浓度检测信号提取部分依据波长调制技术和谐波提取技术可以在一定程度上消除检测系统受到的低频噪声的干扰。驱动信号中参考驱动段驱动 DFB 激光器输出的激光波长均处于乙炔气体的非吸收区,因而经过乙炔气体时不会被乙炔气体吸收,而 DFB 激光器在检测驱动段信号驱动下输出的激光波长将覆盖所选择的 1 520 nm 乙炔气体红外吸收峰,当作用于乙炔气体时会被乙炔气体选择性吸收。

2.2　激光器驱动信号数据处理算法

相应于上节阐述的用于单光路 TDLAS 气体检测系统的激光器驱动部分的数据处理算法示意图如下:

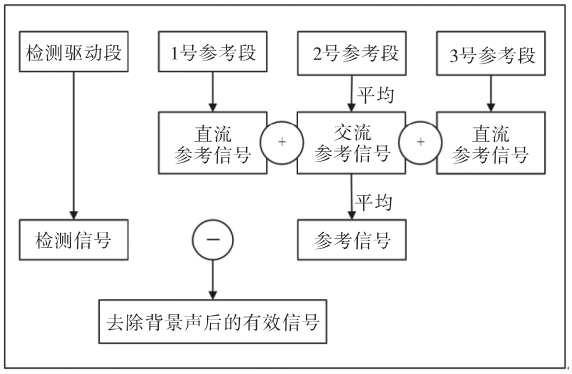


图 3　数据处理算法示意图

激光器在交流参考驱动信号驱动下出射激光通过待测气体后由数据采集单元输出的信号为交流参考信号;激光器在直流参考电流驱动信号驱动下出射激光通过待测气体后由数据采集单元输出的信号为直流参考信号;激光器在检测驱动信号驱动下出射激光通过待测气体后由数据采集单元输出的信号为检测信号。在气体浓度计算中,将交流参考信号取平均值再和直流参考信号加和取平均值的结果作为参考信号,然后将得到的参考信号与检测信号进行差分运算处理。该检测方法可以实现在不增加气体检测系统复杂度的前提下,去除交流和直流背景噪声的干扰,有利于提高气体浓度检测的精度。

3　电路设计

3.1　激光器驱动系统整体设计

激光器驱动系统主要包含主控单元、低频类梯形

波信号发生单元、高频正弦波信号发生单元、信号叠加单元和电压电流转换单元。

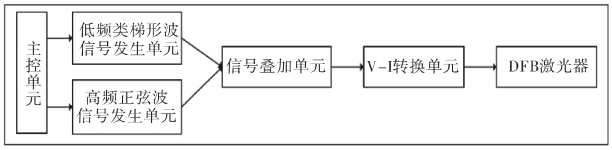


图 4 激光驱动系统整体框图

综合系统的功能需求和运算处理能力等选择 NXP 公司的 ARM7 系列的 LPC2138 作为本激光器驱动模块的主控器。在工作过程中,首先由主控器控制低频类梯形波信号发生单元和高频正弦波信号发生单元分别输出相应的信号,之后经过信号叠加单元将信号叠加,最后由 V-I 转换单元输出电流信号用于驱动激光器工作。

3.2 低频类梯形波信号发生单元

本模块的低频类梯形波信号由 DAC60501 芯片输出。DAC60501 是 TI 公司生产内部自带 2.5 V 精密基准的 12 位单通道数模转换器。该芯片具有输出信号线性度好,毛刺少和噪声低的优点,且该芯片兼容 SPI 和 I2C 两种通信接口,可以方便与微控制器进行通信。电路如图 5 所示。

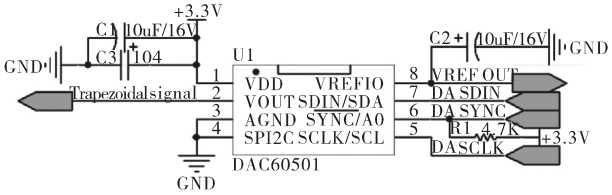


图 5 低频类梯形波信号产生电路图

DAC60501 输出电压与其 VREFIO 管脚电压具有直接关系,芯片默认使用内置 2.5 V 参考电压,通过对芯片内部的参考分频器以及芯片通道增益的设置,DAC60501 芯片输出电压的表达为:

$$V_{OUT}=2.5\times\frac{DAC_DATA}{4\ 096} \tag{1}$$

3.3 高频正弦波信号发生单元

本论文的高频正弦波信号选用直接数字频率合成器(DDS) 生成。利用 DDS 生成高频信号相比于其他高频信号生成技术具有输出波形频率范围宽、分辨率高和相位输出连续性好等优势[19-20]。

本模块最终选取 ADI 公司的 DDS 芯片生成所需的高频正弦信号,具体选用的芯片型号为 AD9833。AD9833 芯片内部 28 位频率寄存器,在外接 25 M 参考时钟源条件下,芯片可输出信号的最大频率为 12.5 MHz,分辨率最小可达到 0.1 Hz。芯片采用 MSOP10 封装,产生高频信号波的电路小巧。高频信号产生电路如图 6 所示。

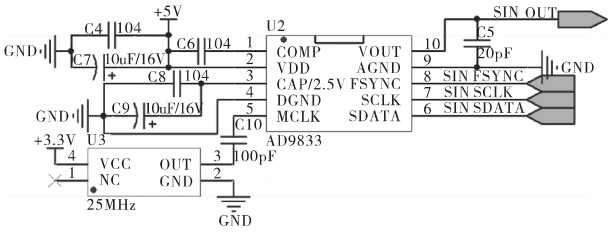


图 6 高频正弦波生成电路

AD9833 内部数控振荡器的主要核心元件为一个 28 位的相位累加器,其实际上是一个可变模计数器,在 25 MHz 参考时钟源控制下,相位累加器以固定步长增加并存储,这个固定步长则是由外部输入的 N 位频率控制字决定。相位累加器将累加结果作为一个地址传送给芯片内部的 ROM 查询表,ROM 表根据地址信息查找相应的幅值并将这个二进制数字信息传给数模转换器,最后转换成相应的模拟量输出。AD9833 输出频率公式可表示为:

$$f_{out}=M(f_{MCLK}/2^{28}) \tag{2}$$

M 为外部输入的频率控制字,其范围为: $0\leqslant M\leqslant 2^{28}-1$。

3.4 信号叠加单元

在前两小节中利用设计的低频类梯形波信号发生单元和高频正弦波信号发生单元分别可以得到频率为 10 Hz 的类梯形波和频率为 5 kHz 的正弦波,为了得到驱动激光器的电流信号需要首先将两路信号叠加。信号叠加部分电路如图 7 所示。

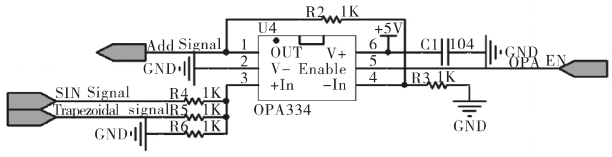


图 7 信号叠加电路图

在信号叠加部分,选用的是 TI 公司的 OPA334 芯片,该芯片是一款单电源供电的 CMOS 运算放大器,具有低偏置电压和低温漂的优势。低频类梯形波信号和高频正弦波分别从芯片的+In 引脚输入,叠加后产生特定波形的信号从 OUT 引脚输出。

3.5 电压电流转换单元

由于叠加后输出的为电压信号,而选用的 DFB 激光器需要在精确的电流控制下工作,因此还需要完成将电压信号转换为电流信号(V-I) 的电路设计。

所设计的 V-I 转换电路如图 8 所示。

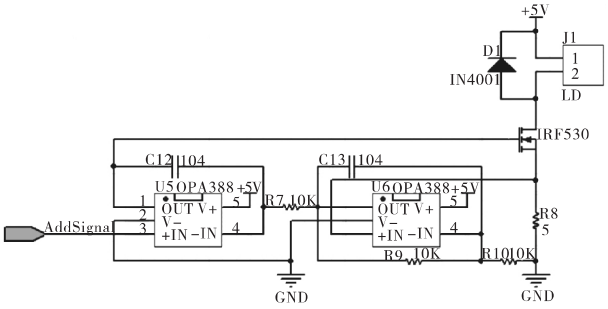


图 8　V-I 转换电路图

本部分利用运算放大器,MOSFET 管,精密电阻搭建 V-I 转换电路。运算放大器作为 V-I 转换电流的重要器件,其性能严重影响信号输出质量,在选取时重点挑选具有低电压噪声系数、低输入失调电压、低温漂、高放大器增益带宽和高转换速率等特性的芯片,最终选取 TI 公司生产的一款精密运算放大器: 0PA388。R8 为采样电阻,其电流等于流过激光器的电流。流过激光器的电流 I_{LD} 可表示为:

$$I_{LD}=\frac{V_{in}R10}{R8(R9+R10)} \tag{3}$$

R8 作为采样电阻其阻值大小、精度、温漂系数以及功耗等因素都会影响激光器驱动电流的精度,因此这里选取 5 Ω,精度为千分之一,低温漂系数的电阻。由于 R8、R9、R10 的阻值固定,因此流过激光器的电流与输入电压成线性关系。

4　气体检测系统搭建与实验测试

4.1　乙炔气体检测实验系统搭建

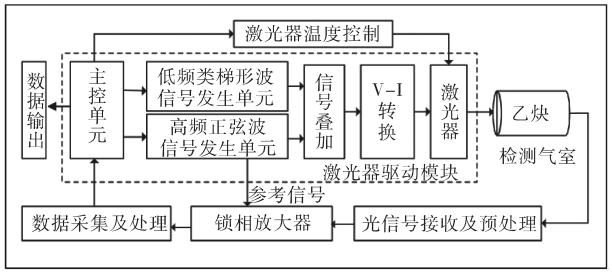


图 9　乙炔气体检测实验系统框图

如图 9 所示为搭建的乙炔气体检测实验系统,其中激光器驱动部分使用本论文所设计的激光器驱动系统。激光器温度控制模块的作用是保障激光器能够稳定地工作在 25℃ 条件下。激光器在电流驱动模块控制下输出相应波长的激光。搭建的实验系统选用光程为 10 m 的气室,在乙炔气体浓度检测实验中,向气室内充入乙炔气体,激光穿过气室,被乙炔气体选择性吸收后,衰弱的激光由 THORLABS 公司生产的 FD10D 光电探测器接收完成光信号到电流信号的转换。包含气体浓度信息的电流信号经过预处理转换为放大的电压信号传送给美国斯坦福仪器公司生产的 SR530 锁相放大器,锁相放大器进行二次谐波信号的提取。最后由数据采集模块对信号采集并进一步完成数据处理工作后将检测结果输出。

4.2　实验测试

4.2.1　激光器驱动信号测试

为了验证激光器驱动系统的功能,利用 V-I 特性与所选用的激光器相近的假负载代替激光器,并通过测量 5 Ω 标准采样电阻两端的电压来验证信号叠加电路和 V-I 转换电路的信号输出特性。图 10 为利用示波器观察的信号叠加电路和 V-I 转换电路生成的信号波形图。

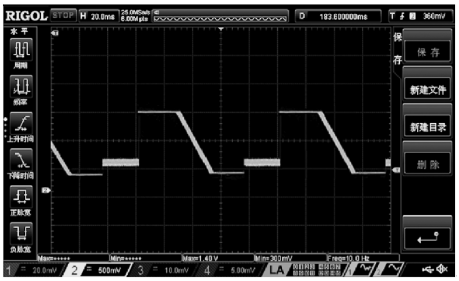


图 10　激光器驱动信号波形图

4.2.2　乙炔气体检测实验测试

采用静态配气法分别配置 200×10^{-6}、400×10^{-6}、600×10^{-6}、800×10^{-6}、和 $1\ 000\times10^{-6}$浓度的 5 种乙炔气体以备实验使用。接通电源,激光器驱动部分开始工作,控制激光器输出特定波长的激光,激光穿过检测气室并由光电信号采集模块接收经过处理后传送给锁相放大器进行信号提取,最后经过数据处理将气体检测结果输出,记录实验结果。

为了验证所设计的激光驱动系统应用于实际的单光路 TDLAS 气体检测中能够提高气体检测精度,本文设计了对比实验: 搭建乙炔气体检测系统,除激光器驱动部分外,其余模块以及实验条件均不变,应用常规的锯齿波叠加高频正弦波的激光驱动方式驱动激光器出射特定波长的激光,完成乙炔气体浓度检测实验,将检测结果记录。

采用两种激光器驱动方式搭建的乙炔气体浓度检测系统的实际乙炔气体浓度检测实验数据如表 1 所示。

表 1　乙炔气体检测实验数据

乙炔浓度/10^{-6}	常规激光驱动方法的检测系统测定乙炔浓度/10^{-6}	本论文激光驱动方法的检测系统测定乙炔浓度/10^{-6}
200	218.8	214.0
400	418.4	413.4
600	579.0	584.4
800	818.4	812.7
1 000	998.5	992.2

表 1 显示的是分别采用两种激光器驱动方式的检测系统的实际乙炔气体浓度检测数据,下面分别计算其检测误差。

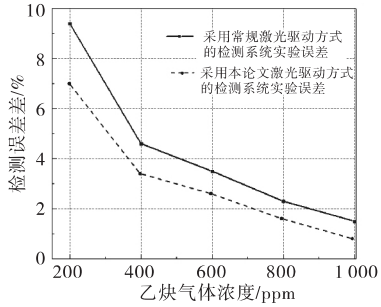


图 11 两种检测系统实测乙炔浓度误差对比图

由图 11 中的数据对比可以看出,在单光路 TDLAS 气体检测系统中采用本论文设计的激光驱动方式相比于常规的激光驱动方式在气体检测过程中能够在一定程度上提高检测系统的检测精度。

5 结语

本文针对单光路 TDLAS 气体检测系统,提出了一种去除系统本身和背景环境中噪声的激光器降噪驱动方案。该方案通过分时复用的方式将激光器驱动信号分为参考驱动段和检测驱动段,并通过在不同的参考驱动段选择性叠加交流信号的方式,分为直流参考驱动段和交流参考驱动段。选择乙炔气体作为检测对象,针对适用于乙炔气体检测的 DFB 激光器设计驱动信号,给出具体的波形参数,阐述了数据处理算法。在此基础上,进一步设计了激光器驱动系统,由主控器控制信号发生单元分别产生所需要的低频信号和高频信号,并经过信号叠加单元和电压电流转换单元生成激光器驱动信号。最后搭建单光路 TDLAS 乙炔气体浓度检测实验系统,对所配置的 200 $\times10^{-6}$~1 000$\times10^{-6}$范围内的 5 种乙炔气体进行了浓度测试,实验结果表明,相较于传统的激光器驱动方式,将本论文所设计的激光器驱动系统应用于实际乙炔气体浓度检中,能够在一定程度上提高单光路TDLAS 气体检测系统的检测精度。

参考文献

[1] 李春光,董磊,王一丁,等. 基于 TDLAS 和 ICL 的紧凑中红外痕量气体探测系统[J].光学精密工程,2018,26(08):25-31.
[2] 马欲飞,佟瑶,何应,等. 石英增强光声光谱技术研究进展[J]. 发光学报,2017(7).
[3] 激光吸收光谱技术在工业生产过程及安全预警标识性气体监测中的应用[J].光学精密工程,2018,26(08):95-107.
[4] 何启欣,刘慧芳,李彬,等. 基于可调谐激光二极管吸收光谱的乙炔在线检测系统[J].光谱学与光谱分析,2016,36(11):3501-3505.
[5] 季文海,吕晓翠,胡文泽,等.TDLAS 技术在烯烃生产过程中的多组分检测应用[J].光学精密工程,2018,26(08):1837-1845.
[6] 陈坤,李永华. 基于 TDLAS 原理的多光程高精度微量气体检测系统[J].应用激光,2018,38(06):993-999.
[7] 房思超. TDLAS 型 CO_2 气体检测技术的仿真研究及系统研制[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2017.
[8] 高彦伟,张玉钧,陈东,等.基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度测量研究[J].光学学报,2016,36(03):275-281.
[9] 臧益鹏,聂伟,许振宇,等.基于可调谐二极管激光吸收光谱的痕量水汽测量[J].光学学报,2018,38(11):393-398.
[10] 李志涛. 基于可调谐半导体激光吸收谱技术的甲烷浓度检测[D].四川:电子科技大学,2017.
[11] 何启欣. 基于红外激光吸收光谱技术的气体检测系统研究[D].吉林:吉林大学,2018.
[12] I.E, Gordon L S, Rothman C,et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer,2017,203.
[13] 彭超,刘学胜,司汉英,等. 多波长半导体激光阵列端泵 Nd:YAG 脉冲激光器[J]. 发光学报,2018,39(2): 162-168.
[14] 董宁宁,崔锦江,徐建根,等.1470nm 大功率半导体激光溶脂仪控制系统设计[J]. 光学精密工程,2018,26(08):66-73.
[15] 鹿洪飞,王彪,范兴龙,等.TDLAS 氨气检测系统 VCSEL 激光器驱动电路设计[J].激光杂志,2019,40(01):22-25.
[16] 骆伟岸,王晗,陈新度等. 三通道 PWM 的数控调光调色方法[J]. 发光学报,2018,39(3): 414-421.
[17] 高敏杰,卜雄洙,张又戈,等.基于 FPGA 的可调谐半导体激光器驱动电路设计[J].激光杂志,2019,40(01):115-119.
[18] 李雪辰,吴凯玥,张琦等. 锯齿波激励氩气介质阻挡放电的发光特性[J]. 发光学报,2018,39(3): 349-355.
[19] 黄丽,刘永芳.基于 FPGA 和 DAC 的扫频信号发生器的研制[J].自动化与仪器仪表,2019(03):8-10.
[20] 李玲霞,贾帅,卢伟,等.基于 FPGA 的 AD9915 控制设计[J].电子器件,2018,41(02):489-494.