

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.02.007

用于 TDLAS 甲烷检测的激光器电流驱动与温控系统

姜建国, 赵宇, 刘松斌

(东北石油大学 电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 为了满足激光器在甲烷气体检测中对输出波长稳定的需求, 自主设计以 STM32F103RCT6 为微处理器核心的电流驱动系统和温控系统, 包括信号发生电路、滤波电路、温度采集与控制电路等, 运用信号发生芯片生成锯齿扫频信号、正弦调制信号、直流偏置信号, 把他们叠加作为激光器注入电流, 同时对激光器整体构建二级制冷系统, 通过温度和电流的调谐使激光器发出的波长在甲烷气体吸收峰 1 653.72 nm 附近扫描, 以使气体充分吸收。经验证, 整个系统工作稳定, 可持续工作时间超过 36 h, 温度误差为 $\pm 0.008\text{ }^{\circ}\text{C}$, 电流驱动误差 $\leq 0.09\text{ mA}$, 波长误差在千分位, 满足设计需求。

关键词: 激光器; 电流驱动; 温控系统; 抗积分饱和 PID

中图分类号: TN248.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2018)02-053-07

A laser drive current and temperature control system for TDLAS methane detection

JIANG Jianguo, ZHAO Yu, LIU Songbin

(School of Electrical Engineering and Information, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, P.R.China)

Abstract: In order to satisfy the requirements of laser on the output wavelength stability in the methane gas detection, a current driving and temperature control system is designed with taking STM32F103RCT6 as the microprocessor core, including signal generating circuit, filter circuit, and temperature acquisition and control circuit, etc. The signal chip is used to generate sawtooth frequency sweep signal, sine modulated signal and DC bias signal, and all the signals are stacked as laser injection current. At the same time, a secondary cooling system for laser is built to make the laser wavelength scan near the methane gas absorption peak(1 653.72 nm) through the tuning of temperature and current, and thus the gas can be fully absorbed. Experiments show the whole system works stably, and it can work sustainably more than 36 h with temperature error of $\pm 0.008\text{ }^{\circ}\text{C}$, current drive error of 0.09 mA or less and wavelength error in micrometer level, which meets the design requirements.

Keywords: laser; drive current; temperature control system; anti-saturation integral PID

收稿日期: 2017-05-10

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(E2016013)。

Supported by Heilongjiang Province Natural Science Foundation(E2016013).

作者简介: 姜建国(1966—), 男, 东北石油大学教授, 主要从事电力电子与电力传动方向研究, (E-mail) jggnepu@163.com。

甲烷是一种易燃易爆高危险性的气体,在自然界分布十分广泛,因此,在煤矿安全、管道检测以及油田开采等领域都需要对甲烷浓度进行高精度的实时监测^[1-4]。传统的检测方法有催化燃烧法、气相色谱法、压电法等,他们都存在危险性高、工作不稳定、寿命短、精度低等缺陷。可调谐激光二极管吸收光谱技术(TDLAS)是一种新型的非接触式气体检测方法,相较于传统气体检测技术,具有高灵敏度、高选择性、速度快等优点,已经成为各国气体检测领域中主要的研究方向^[5-10]。通过高频调制某个依赖于频率的信号,使其扫过待测气体的吸收峰,再以调制频率的倍频做参考信号进行处理。根据 Beer-Lambert 定律,通过分析进入被测气体前后激光器发出激光的光强,来进一步计算出被测气体的浓度。甲烷气体检测中,激光器的输出波长受温度和注入电流的影响,因此,为了保证检测系统的稳定性和精度,稳定激光器的输出波长,严格控制激光器的注入电流和激光器的温度至关重要^[11-16]。

1 系统方案设计

本设计主要研究 TDLAS 甲烷气体检测系统的前端驱动部分,包括电流驱动和激光器温度控制。由 HITRAN 数据库得到甲烷气体的吸收谱线图,甲烷气体在 1 653.72 nm 处吸收最强,而且在该吸收线附近没有其他气体的吸收线,可以有效地避免交叉干扰,因此,整个系统以标称 1 654 nm 的分布式反馈激光器(Norcada-Near-IR-DFB-Laser)作为被控对象,电流驱动部分以自主设计的 ARM 内核 STM32 F103RCT6 为核心控制器,通过将 AD9833 发出的高频正弦波和 DAC8830 发出的低频锯齿波、直流偏执信号叠加,作为压控恒流源的控制信号,实现激光器的电流驱动。温控系统采用抗积分饱和增量式 PID 算法,SPI 通信方式,利用 DRV592 驱动执行机构半导体制冷器 TEC,应用 24 位高精度 $\Sigma - \Delta$ 模数转换芯片 AD7793 采集激光器内部的温度作为闭环系统的反馈分量,实现高精度的温度控制,温度控制精度为 $\pm 0.008\text{ }^{\circ}\text{C}$,达到国内领先水平。系统整体设计如图 1 所示。

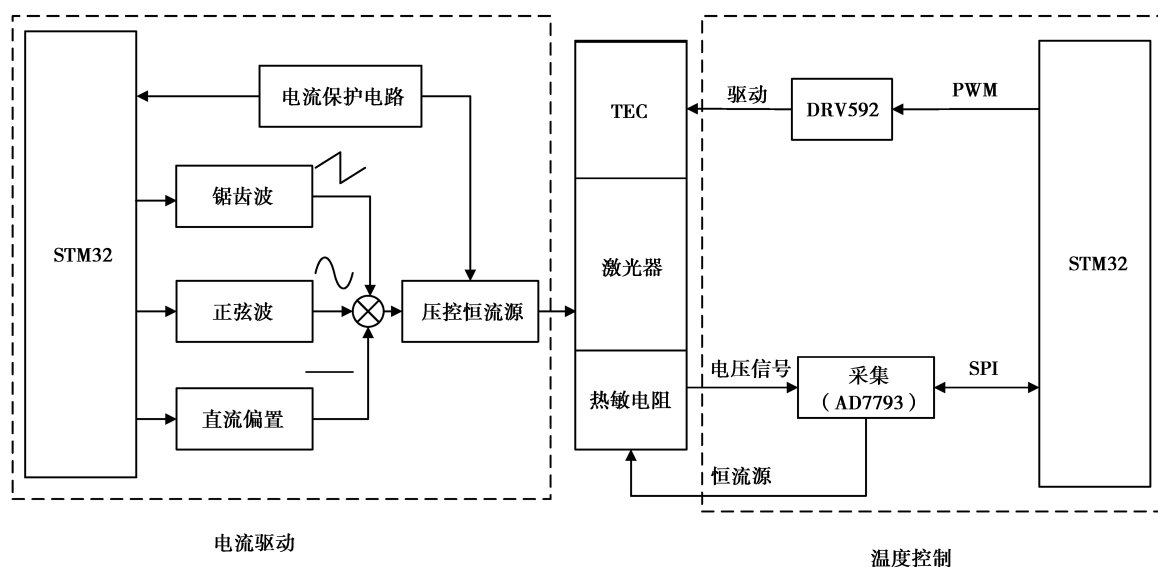


图 1 系统结构图

Fig.1 System structure diagram

2 电流驱动

以 STM32 为主控芯片,控制 DDS 芯片 AD9833 产生 10 kHz 的高频正弦调制波,DAC8830 产生 10 Hz 的低频锯齿波和直流偏置信号,采用 LTC1064 设计四阶带通滤波器,滤除高频正弦波中的噪声,最后通过加法电路和压控恒流源来实现激光器的电流驱动。

2.1 波形发生

直流偏置与锯齿波:采用芯片 DAC8830,其为 TI 公司生产的 16 位超低功耗的电压输出数模转换器,具有精确度高、干扰小、噪声低以及稳定速度快等优点,采用 SPI 方式进行通信,5 V 电压供电,电路参考电压为 2.5 V,参考电压经 10 μ F 钽电容与 0.1 μ F 陶瓷电容并联后引至 DAC8830 的 VREF 引脚,为提高其带载能力,输出端接 OPA188 构成的电压跟随器。锯齿波产生电路与直流偏置电路基本相同,不做过多说明。

正弦波:采用 ADI 公司的 AD9833 波形发生器,它是一款能够产生正弦波、三角波和方波输出的 DDS 芯片。DDS 芯片是从相位概念出发的直接合成所需波形的全数字化频率合成技术芯片,具有成本低、功耗低、分辨率高和转换时间短等优点,无需外接元件,输出频率和相位等可以通过软件编程,易于调节,解耦电容能产生高达 12.5 MHz 的正弦波,频率寄存器是 28 位,主频时钟为 1 MHz 时,精度可以达到 0.004 Hz。

正弦波输出频率为

$$f_{MCLK} / 2^{28} \times F。$$

F 为所选频率控制字,由外部编程给定,相移为

$$2\pi / 4096 \times P,$$

P 为所选相位控制字。

2.2 滤波环节

DDS 芯片的数字器件非理想不连续特性并因此产生的量化误差和相位误差会使输出波形含有大量噪声。为了消除 AD9833 产生高频正弦波所含的噪声和直流偏置,在其后级设计中心频率为 10 kHz 的带通滤波电路,滤除低频和低频噪声,以获得纯净的正弦波。带通滤波电路由 Linear 公司生产的 LTC1064 构成。

如图 2 所示,本次设计的滤波电路令 LTC1064 工作在双电源供电条件下,正负电源引脚均采用 0.1 μ F 电容进行去耦,比例选择引脚接地,这样 A 模块和 D 模块的中心频率与外部时钟频率比值为 1/100。令 A 模块工作于主模式下的模式 1,D 模块工作于主模式下的模式 3,A、D 模块级联构成 4 阶带通滤波电路,外部时钟由 1 MHz 的有源晶振提供,通过外部电路电阻的取值,保证四阶带通滤波电路的中心频率为 10 kHz。

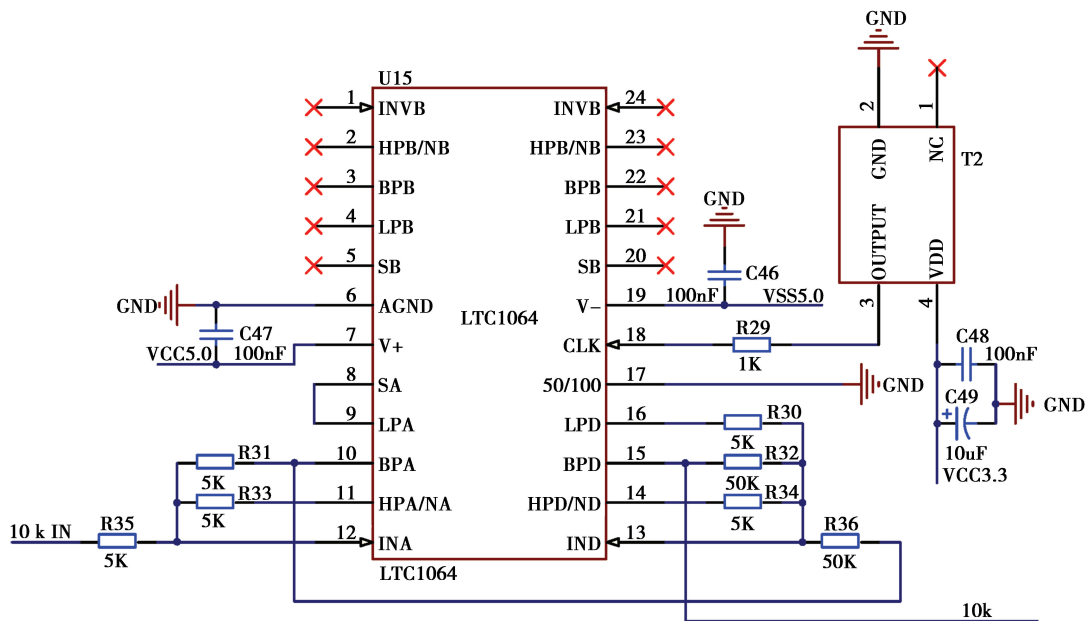


图 2 滤波器电路图

Fig.2 Filter circuit diagram

其中,模式 1 状态下:

$$f_0 = \frac{f_{\text{clk}}}{100} = \frac{1\,000\text{K}}{100} = 10\text{K},$$

$$H_{\text{OBP}} = -\frac{R_{31}}{R_{35}} = -1; Q = \frac{R_{31}}{R_{33}} = 1;$$

模式 3 状态下:

$$f_0 = \frac{f_{\text{CLK}}}{100} \sqrt{\frac{R_{34}}{R_{30}}} = 10\text{K},$$

$$H_{\text{OBP}} = -\frac{R_{32}}{R_{36}} = -1; Q = \frac{R_{32}}{R_{34}} \sqrt{\frac{R_{34}}{R_{30}}} = 10。$$

2.3 PCB 布线

驱动电路对精度要求较高,采用四层板结构,由于驱动电路中使用了较多的 A/D 和 D/A 芯片,为了保证参考地完整,电路采用“统一地”,但仍需要保证数字电路部分和模拟电路部分有不同的电流回路。对于使用 SPI 通信的器件,令其串行时钟走线与数据走线长度尽量保证相等,优先布复位、片选等关键信号线,对各部分按照功能就行分区,模拟电路部分的芯片地引脚的走线采用“Y 型”连接至一点,对于高频大功率器件 DRV592,将其放置电路边缘,同时为了保证时序完整,减小其与 AD7793 的距离。

3 温控系统

3.1 电路设计

激光器在工作时会产生大量的热,占总功耗的 55%~70%,如果这些热量不能及时地散发,将会影响激光器发出的波长,严重的还可能造成激光器的损坏,因此,必须严格控制激光器的温度。本设计采用以 STM32 为内核的核心控制器,通过 SPI 方式与一个 24 位的高精度模数转换芯片 AD7793 连接,进一步来读取激光器内部热敏电阻的阻值,实现数字 PID 反馈控制。通过 STM32 输出脉宽调制波形到 DRV592 功率放大器中,从而控制通过 TEC 电流的方向,以达到制冷或者加热的效果。因两路输出均为高频 PWM 波,故在两个输出端均需采用高频电感与高频电容构成的低通滤波器进行滤波,高频电感和高频电容采用的型号分别为 CDRH104R 和 ECJ-4YB1C106K。

热电制冷器 TEC 是利用半导体材料帕尔帖效应制成的。帕尔帖效应是指当直流电流通过两种半导体材料组成的电偶时,一端吸热、一端放热的现象。当有电流从 TEC 流过时,电流产生的热量会从 TEC 的一侧传到另一侧,在 TEC 上产生“热”侧和“冷”侧。为了提高温度控制的精度,热敏电阻选择恒流源的激励方式,采样时刻与 PWM 开关时刻避开,采用查表法和拉格朗日线性插值相结合来计算热敏电阻的阻值。

3.2 控制算法实现

对于温度这一比较滞后的控制对象,在反馈环节热敏电阻值读取时增加数字滤波,避免偶然出现的脉冲干扰,选用相对较低带宽的控制器,采用增量式数字 PID 算法,每一次的增量值只与前后两次的采样值有关,与传统 PID 控制方法相比,大大减小了计算量,加快了系统的响应速度。

离散后的 PID 方程:

$$u_k = K_p [e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j + T_d \frac{e_k - e_{k-1}}{T}], \quad (1)$$

两次采样之间的增量差值:

$$\begin{aligned} \Delta u_k &= u_k - u_{k-1} \\ &= K_p [e_k - e_{k-1} + \frac{T}{T_i} e_k + T_d \frac{e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}}{T}] \\ &= K_p (1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T}) e_k - K_p (1 + \frac{2T_d}{T}) e_{k-1} + K_p \frac{T_d}{T} e_{k-2}。 \end{aligned}$$

考虑到温度 PID 控制算法执行时容易出现积分饱和的现象,即 PID 控制器输出由于积分作用不断加大,导致执行器达到极限位置,此时如果偏差方向不改变则进入积分饱和区,进入饱和区越深,退饱和所需要的时间越长,这段时间将会导致系统失去控制,因此,为了更好地控制温度,延长使用寿命,采用抗积分饱和 PID 方法。在计算控制量输出 $u(k)$ 时先判断上一时刻的控制量 $u(k-1)$ 是否已经超出限制范围,若 $u(k-1) \geq U_{max}$ 则只累加负偏差,如果 $u(k-1) \leq U_{min}$ 则只累加正偏差。具体流程如图 3 所示。

4 实验结果

如图 4 所示,为系统整体实物图。以 STM32 为核心,将芯片 DAC8830、AD9833 产生的偏置信号、锯齿信号和正弦信号进行叠加,叠加后的图形如图 5 所示。将叠加后的信号作为压控恒流源的控制信号,这样每一个电流信号都对应着特定的电压信号,通过对电压信号的控制便可实现对激光二极管驱动电流的控制,同时使温度稳定在 $(25 \pm 0.008)^\circ\text{C}$ 范围内,温度控制曲线如图 6 所示。为了更加直观地观察温度的变化和控制效果,使激光器发出中心波长为 $1\ 653.72\ \text{nm}$ 、扫描范围为 $\pm 0.4\ \text{nm}$ 的激光,对应的光谱分析仪上显示的波形如图 7 所示。在 $25\ ^\circ\text{C}$ 时,人为校正偏置信号电路的误差,获得偏置电压对应激光波长的数据如表 1 所示。实验得到激光器发出波长为 $1\ 653.72\ \text{nm}$ 激光时的驱动电流为 $62.05\ \text{mA}$ 。压控恒流源实验及激光器波长与电压实验数据如表 1 和表 2 所示。

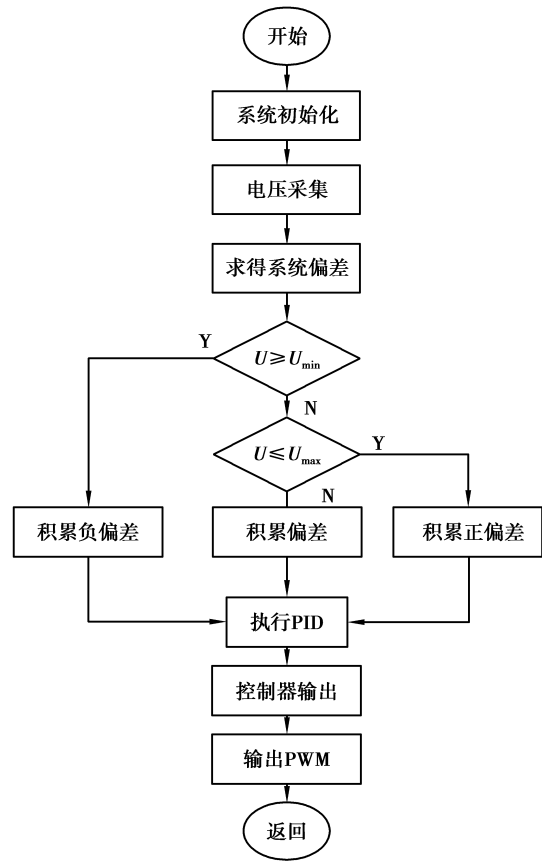


图 3 抗积分饱和和 PID 流程图

Fig.3 Anti-integral saturation PID flow chart

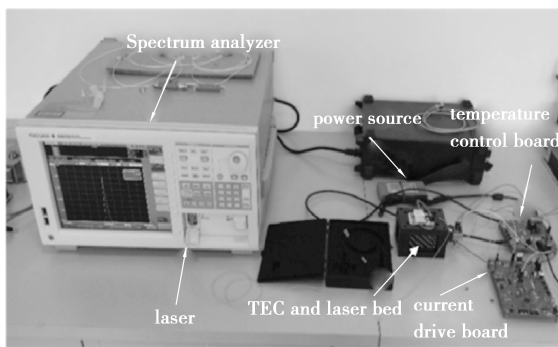


图 4 系统实物图

Fig.4 System physical map

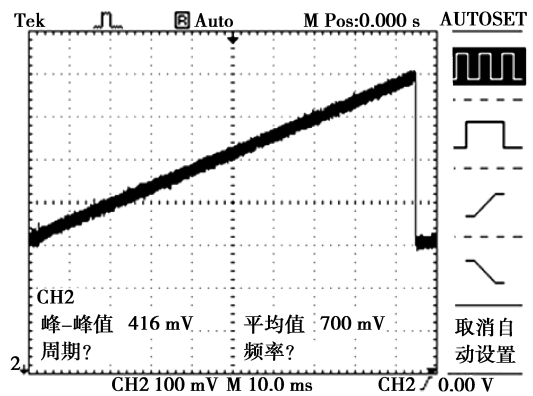


图 5 叠加信号波形

Fig.5 Superimposed signal waveform

表 1 压控恒流源实验数据/mA

Table 1 Voltage controlled constant current source data/mA

期望电流	59.30	59.95	60.04	61.44	62.05
实际电流	59.23	59.90	60.13	61.35	61.97
电流偏差	0.07	0.05	0.09	0.08	0.08

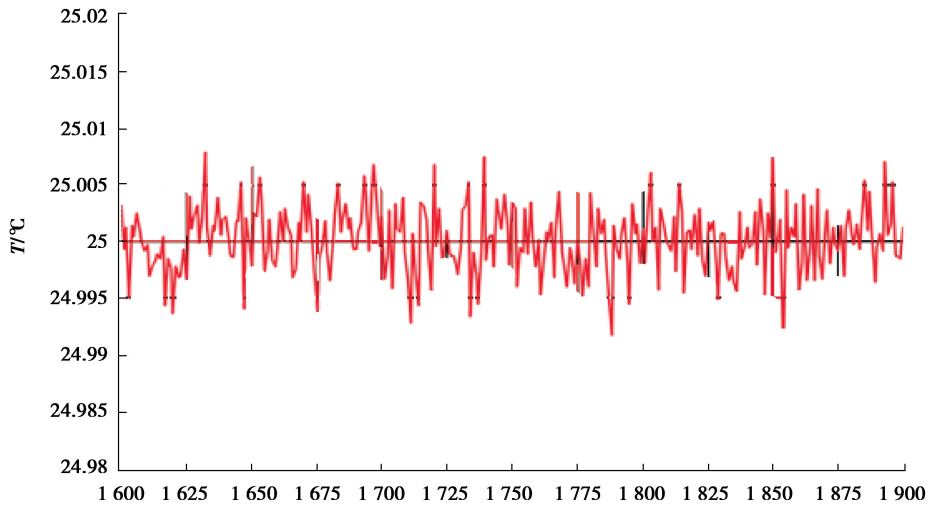


图 6 温度曲线图

Fig.6 Temperature curve

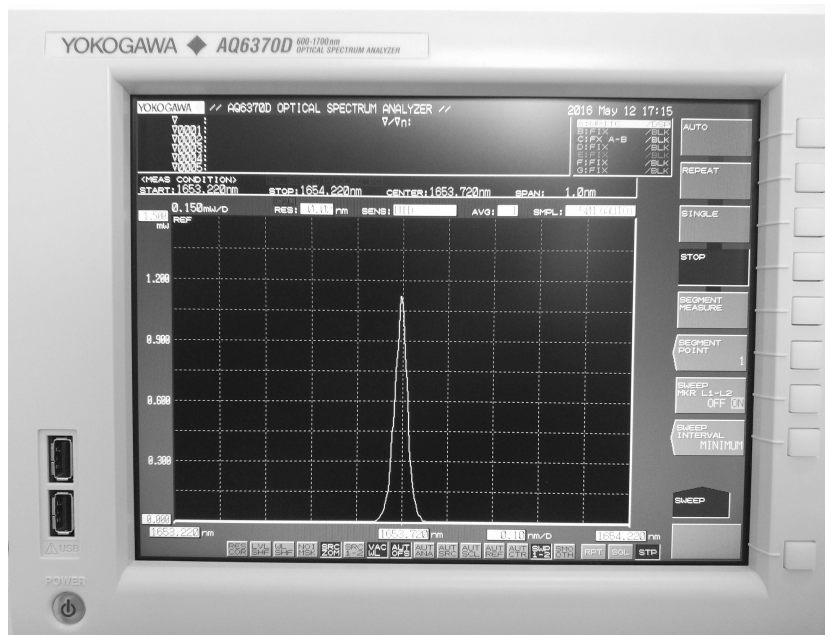


图 7 发出激光波形

Fig.7 Emitting laser waveform

表 2 波长与偏置电压对应数据

Table 2 Wavelength corresponds to the offset voltage

电压/V	1.272	1.250	1.241
电流/mA	63.60	62.50	62.05
波长/nm	1 653.740	1 653.727	1 653.718

5 结 语

基于 TDLAS 原理,以标定波长为 1 654 nm 的分布式反馈激光器(Norcada-Near-IR-DFB-Laser)作为光源,自主设计的为 STM32F103RCT6 为核心的处理器,结合芯片 DAC8830、AD9833 构成驱动信号,经压控恒流源转换后作为激光器的注入电流。另外采用抗积分饱和 PID 控制算法与数字滤波结合,利用大功率 DRV592 驱动热电制冷器 TEC,使激光器温度稳定在 25 °C 附近。电流驱动板和温度控制板在设计时充分考虑抗干扰性、信号的回流路径,减小信号的回路面积,系统采用统一的“地平面”各部分按功能分区,为电源提供参考平面,并进行分割。经过实验验证,系统可以长时间稳定工作,抗干扰能力强,当驱动电流为 62.05 mA 时,激光器发出波长为 1 653.72 nm,温度控制精度为 ± 0.008 °C,波长控制精度误差达到千分位,充分满足设计要求。其突出优点为功耗小,仅为 10W,分辨率高,具有一定的通用性,调节激光器的波长可以对不同气体进行检测。

参考文献:

- [1] 荆耀秋,江毅,肖尚辉,等.一种差分吸收式光纤瓦斯传感系统[J].光子学报,2014,43(4):1-4.
JING Yaoqiu, JIANG Yi, XIAO Shanghui, et al. A differential absorption optical fiber gas sensor system[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 1-4. (in Chinese)
- [2] 廖明佳,乔雷,陈海岸,等.镍钴硫化物的制备及其反应温度对形貌和超级电容器性能的影响[J].重庆大学学报,2016,39(6):95-100.
LIAO Mingjia, QIAO Lei, CHEN Haian, et al. The preparation of nickel and cobalt sulfides and reaction temperature on the morphology and the influence of the super capacitor[J]. Journal of Chongqing university, 2016, 39(6): 95-100. (in Chinese)
- [3] 刘松斌,赵宇,李晶娜,等.TDLAS 甲烷气体检测中驱动信号发生电路的设计[J].化工自动化及仪表,2017,44(1):21-23.
LIU Songbin, ZHAO Yu, LI Jingna, et al. The design of the driving signal generator in TDLAS methane gas detection[J]. Chemical automation and instrumentation, 2017, 44(1): 21-23. (in Chinese)
- [4] 张世峰,程曾婉,陈威,等.基于 SVR 的焦炉冷鼓系统预测控制[J].重庆大学学报,2017,40(9):76-82.
ZHANG Shifeng, CHENG Zengwan, CHEN Wei, et al. Predictive control of coke oven cold drum system based on SVR[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(9): 76-82. (in Chinese)
- [5] 姚华.采用可调谐激光吸收光谱技术遥测甲烷气体浓度的研究[D].杭州:浙江大学,2011.
YAO Hua. With tunable laser absorption spectrum technology of remote sensing research of methane gas concentration[D]. Hangzhou: Zhejiang university, 2011. (in Chinese)
- [6] 郝艳萍,张书敏,王新占,等.基于多模光纤滤波器的可调谐掺铒光纤激光器[J].光学学报,2011,31(8):205-210.
HAO Yanping, ZHANG Shumin, WANG Xinzhan, et al. Based on multimode fiber filter of tunable erbium-doped fiber laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 31(8): 205-210. (in Chinese)
- [7] 许琰.可调谐窄线宽光纤激光器研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
WANG Yan. Tunable narrow linewidth fiber laser is studied[D]. Harbin: Harbin institute of technology, 2010. (in Chinese)
- [8] 杨银平.基于 TDLAS 的甲烷气体监测系统的研究[D].安徽:合肥工业大学,2011.
YANG Yinping. Based on the research of TDLAS methane gas monitoring system[D]. Anhui: Hefei university of technology, 2011. (in Chinese)
- [9] 熊东,黎小娇,李庆文,等.汽车转弯自动照明控制系统数据采集滤波方法[J].重庆大学学报,2016,39(3):68-74.
XIONG Dong, LI Xiaojiao, LI Qingwen, et al. Car turn automatic lighting control system data acquisition filter method[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(3): 68-74. (in Chinese)
- [10] 王琢,曹家年,张可可,等.光学式低浓度甲烷气体传感器的研究[J].光子学报,2011,40(2):250-260.

- WANG Zhuo, CAO Jianian, ZHANG Keke, et al. The research of low concentration methane gas sensor system[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(2): 250-260. (in Chinese)
- [11] 庞涛, 王煜, 夏滑, 等. 基于 TDLAS 技术的全量程激光甲烷甲烷传感器[J]. 光子学报, 2016, 45(9): 1-6.
PANG Tao, WANG Yu, XIA Hua, et al. Based on the full range of TDLAS technology laser methane methane sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(9): 1-6. (in Chinese)
- [12] 付丽, 党敬民, 苗春壮, 等. 室温连续中红外量子级联激光器驱动电源的研制[J]. 光子学报, 2015, 44(12): 30-37.
FU Li, DANG Jingmin, MIAO Chunzhuang, et al. Room temperature infrared quantum cascade lasers in continuous drive power supply[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(12): 30-37. (in Chinese)
- [13] 陈东, 张伯昆, 胡燮, 等. 基于差频中红外激光的痕量气体高分辨光谱检测研究[J]. 光子学报, 2012, 41(6): 633-672.
CHEN Dong, ZHANG Bokun, HU Xie, et al. Research on the high resolution trace gas detection based on the difference-frequency mid-infrared spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(6): 633-672. (in Chinese)
- [14] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110(9/10): 533-572.
- [15] Duffin K, McGettrick A J, Johnstone W, et al. Tunable diode-laser spectroscopy with wavelength modulation: a calibration-free approach to the recovery of absolute gas absorption line shapes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(10): 1-15.
- [16] Sun K, Chao X, Sur R, et al. Analysis of calibration-free wavelength-scanned wavelength modulation spectroscopy for practical gas sensing using tunable diode lasers[J]. Measurement Science & Technology, 2013, 24(12): 5203.

(编辑 王维朗)