



扫码阅读下载

于庆,张华乾,郭清华. 煤矿氧气检测高精度 VCSEL 驱动及温控电路设计[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(2): 153-160.

YU Qing, ZHANG Huaqian, GUO Qinghua. A high-precision design of vertical-cavity surface-emitting laser driving circuit and temperature control circuit of coal mine oxygen detection[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(2): 153-160.

DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20230864

煤矿氧气检测高精度 VCSEL 驱动及温控电路设计

于庆^{1,2,3}, 张华乾¹, 郭清华^{2,3}

(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039;

3. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 重庆 400037)

摘要:为解决当前常用煤矿氧气检测仪器易受交叉气体干扰且功耗大的问题,基于 GD32F303RCT6 微控制器和 ADN8834 热电冷却控制器,设计了一种软启动开关电路控制的垂直腔面发射激光器 (Vertical-cavity Surface-emitting Laser, VCSEL) 高精度驱动及温控电路。驱动电路中,高频正弦波信号和低频锯齿波信号叠加的二进制数据由微控制器产生,经信号发生电路、电压电流转换电路转化成 VCSEL 高精度驱动电流信号;温控电路中,设计基于比例积分微分 (Proportional Integral Differential, PID) 补偿电路和数模转换控制器 (Digital to Analog Converter, DAC) 目标温度控制电路实现激光器温度自动调节。测试结果表明:驱动电路的电流输出区间为 0.680~1.360 mA;锯齿波频率误差小于 0.5%,正弦波频率误差小于 0.1%;氧气吸收峰扫描精度高达 0.07 pm,对应电流扫描精度为 0.12 μ A;温控电路的温度控制精度为 ± 0.012 $^{\circ}$ C。满足了可调谐半导体激光吸收光谱 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) 煤矿氧气检测应用需求。

关键词:煤矿; 氧气检测; VCSEL; 高精度驱动及温控电路; PID 补偿电路; DAC 目标温度控制电路

中图分类号: TD679; X936

文献标志码: B

文章编号: 1008-4495(2024)02-0153-08

A high-precision design of vertical-cavity surface-emitting laser driving circuit and temperature control circuit of coal mine oxygen detection

YU Qing^{1,2,3}, ZHANG Huaqian¹, GUO Qinghua^{2,3}

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China;

3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Preventing and Control, Chongqing 400037, China)

Abstract: A high-precision driving circuit and temperature control circuit of vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) controlled by soft starting switching circuit was designed based on GD32F303RCT6 microcontroller and ADN8834 thermoelectric cooling controller. In the driving circuit, the microcontroller generates binary data superposition by high frequency sine wave signal and low frequency sawteeth signal. This is converted into high precision VCSEL driving current signal by signal generation circuit and voltage-current conversion circuit. In the temperature control circuit, the proportional integral differential (PID) compensation circuit and digital to analog converter (DAC) target temperature control circuit was designed to

realize automatic laser temperature adjustment. The results show that, at first, the current output range is from 0.680 mA to 1.360 mA. The frequency error of sawtooth wave is less than 0.5%, and the frequency error of sine wave is less than 0.1%. The scanning accuracy of oxygen absorption peak is up to 0.07 pm, and the corresponding scanning accuracy of current is 0.12 μ A. The temperature control

收稿日期: 2023-10-10; 2023-11-13 修订

基金项目: 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目 (2022-TD-ZD001)

作者简介: 于庆 (1968—), 男, 江苏金坛人, 硕士, 研究员, 主要从事矿山安全监测监控及信息化方面的研究工作。
E-mail: 2382743546@qq.com.

accuracy of the temperature control circuit is $\pm 0.012\text{ }^{\circ}\text{C}$. The tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) for oxygen detection in coal mines meet the application requirements.

Keywords: coal mine; oxygen detection; VCSEL; high-precision driving circuit and temperature control circuit; PID compensation circuit; DAC target temperature control circuit

氧气是人们赖以生存的必需气体。在高浓度氧气环境中,人体会出现“氧中毒”症状;在低浓度氧气环境中人会感到头晕、乏力,严重的甚至会休克或者死亡^[1-2]。因此,实时精准检测氧气浓度对保障煤矿井下工作人员安全极其重要。

煤矿氧气检测技术经历了从催化燃烧检测技术、电化学检测技术、荧光淬灭检测技术到 TDLAS 检测技术的发展历程。目前,市面上煤矿氧气检测仪器主要采用电化学检测技术、TDLAS 检测技术。王璐^[3]、梁运涛^[4]等介绍了一种带有温度及压力补偿的电化学氧气检测技术,该技术降低了温度、环境压力对电化学氧气传感元件的影响,提高了氧气检测精度,但是该技术受交叉气体干扰,无法保证测量的准确性;张远征^[5]、贾传武^[6]提出了温度自适应补偿技术,提高了荧光氧传感器的检测稳定性,但是该技术容易受到含重金属元素的粉尘物质影响,因此无法实现长时间的精准检测;龚仲强^[7]、鹿洪飞^[8]等设计了基于分布式反馈激光器 (Distributed Feedback Laser, DFB) 的煤矿氧气浓度和温度检测系统,该系统显著降低了氧气浓度和温度的检测误差,但 DFB 激光器阈值电流大、热电冷却器 (Thermoelectric Cooler Controller, TEC) 功耗高,导致系统功耗偏大,不适用于煤矿氧气浓度检测。

扫描同一最大氧气吸收峰时,由于 DFB 激光器的电流调谐系数远小于 VCSEL 激光器的电流调谐系数,因此,前者需要更大的调制电流范围^[9]。为了降低功耗,提出了基于 VCSEL 激光器的 TDLAS 煤矿氧气检测系统,该系统的高精度电路使得扫描同一最大氧气吸收峰的调制电流范围从几十毫安降低至几毫安,驱动电流扫描精度提升至微安级^[10]。由于 VCSEL 激光器的电流及温度敏感特性,微弱的电流变化及温度变化均会对 VCSEL 激光器的输出功率和中心波长产生影响^[11-12]。因此,笔者设计了一种基于 GD32F303RCT6 微控制器和 ADN8834 热电冷却控制器芯片的高精度 VCSEL 驱动电路及温控电路。

1 激光气体检测理论与器件选型

TDLAS 气体检测技术是一种针对痕量气体浓度检测的新型技术,在复杂环境下,该技术根据气体在特征吸收光谱上的“指纹”特性,可实现对单一气体的检测^[13-15]。气体分子对红外光谱的能量吸收遵循朗伯-比尔定律,该定律表明红外光吸收度与气体浓度和吸收层厚度的乘积成正比。其数学表达式如下:

$$\ln \frac{I_0(\nu)}{I_t(\nu)} = \alpha(\nu)LC \quad (1)$$

式中: $I_0(\nu)$ 为入射光强,cd; $I_t(\nu)$ 为透射光强,cd; $\alpha(\nu)$ 为摩尔吸光系数, $\text{L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$; L 为光程长度,cm; C 为被测气体的摩尔浓度, mol/L 。

鉴于采用直接吸收光谱技术检测氧气浓度时,检测精度易受到低频噪声的影响,因此,笔者采用波长调制技术将光谱吸收曲线调制到更高频率,以降低低频噪声的影响^[16-20]。理想情况下,半导体激光器的输出功率与调制功率无关,此时激光器的输出光频率可表示如下:

$$\nu(t) = \nu_0 + A \cos(\omega t) \quad (2)$$

式中: ν_0 为输出光的中心频率,Hz; A 为光频率调制幅度,nm; ω 为角速度,rad/s; t 为时间,s。

根据朗伯-比尔定律,出射光 I_t 与入射光 I_0 的关系式如下:

$$I_t = I_0 e^{-\alpha(\nu)LC} = I_0 e^{-\alpha(\nu_0 + A \cos(\omega t))LC} \quad (3)$$

由于近红外波段气体的吸收系数很小,在光程较短和气体浓度较低的情况下,式(3)可近似改写为:

$$I_t \approx I_0 [1 - \alpha(\nu_0 + A \cos(\omega t))LC] \quad (4)$$

将 $\alpha(\nu)$ 展开成傅里叶级数,可得:

$$\alpha(\nu_0 + A \cos(\omega t)) = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(\nu_0) \cos(n\omega t) \quad (5)$$

式中 $H_n(\nu_0)$ 为第 n 次谐波分量的傅里叶系数。

气体吸收光信号由光电转换器接收,并将其转化为电信号,应用锁相放大器提取各次谐波的幅值 S_n ,可表示如下:

$$S_n = KI_0 LCH_n(\nu_0) \quad (6)$$

式中 K 为放大器增益。

由器件说明书和谐波曲线可知 S_n 、 K 、 I_0 、 L 、 $H_n(\nu_0)$ 的值,根据式(6)可计算出被测气体浓度 C 。

笔者选取的 VCSEL 激光器波长扫描宽度为 758.00~762.00 nm,其关键参数见表 1。

表 1 VCSEL 激光器关键参数
Table 1 Key parameters of VCSEL

参数 类型	阈值电流/ mA	运行电流/ mA	温度调谐系数/ (nm·℃ ⁻¹)	电流调谐系数/ (nm·mA ⁻¹)
典型值	0.500		0.06	0.60
最大值		2.000		

由表 1 可知,为确保 VCSEL 激光器的正常运

行,其驱动电流范围为 0.500~2.000 mA。矿井环境、煤矿用大型设备的电磁场会干扰 VCSEL 激光器驱动电流,故设定电流幅值输出为 0.750~1.250 mA。为了能够精准检测到 760.46 nm 吸收峰,根据电流调谐系数,若驱动电流的有效测量位数不少于 14 位,则波长扫描精度小于 0.10 pm。

2 驱动电路及温控电路设计

2.1 电路结构

为了达到 VCSEL 激光器波长控制精度要求,笔者设计了一种具有软启动开关功能的高精度驱动电路及温控电路,驱动及温控电路逻辑结构如图 1 所示。

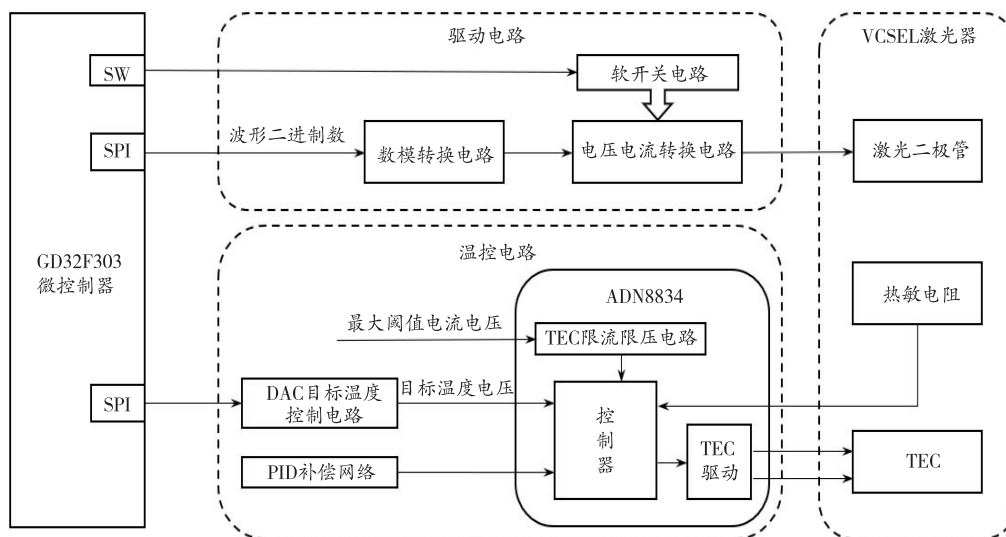


图 1 驱动及温控电路逻辑结构图

Fig. 1 Logic structure diagram of driving circuit and temperature control circuit

2.2 驱动电路

2.2.1 驱动电路原理

驱动电路设计包括主控电路、数模转换电路、电压电流转换电路和软启动开关电路。其工作原理为:①主控电路产生正弦波、锯齿波二进制数据,并将数据传入数模转换电路;②数模转换电路将二进制数据转化为模拟电压;③电压电流转换电路将接收到的模拟电压信号转化为高精度驱动电流信号。上电时,冲击电流不仅会损坏 VCSEL 激光器,同时会产生火花效应给煤矿安全生产带来隐患^[21]。因此,设计了一种软启动开关电路,延长直流电压的导通时间,以减小冲击电流对 VCSEL 激光器的影响。

2.2.2 主控电路及数模转换电路设计

主控电路选用 32 位微控制器 GD32F303RCT6,

该器件拥有 Cortex-M4 处理器,提供了 3 组 16 位 SPI 接口、1 组 SWD 调试接口和 1 个 3 MB 片上 FLASH 存储器,具有高速、高性能、低功耗等优点。

信号发生电路选用数模转换芯片 DAC8830,该器件是 16 位 SPI 串行输入、单通道、低噪声数模转换芯片,其最大线性误差位数为 2 位,在 2.5 V 阈值电压输入条件下,电压分辨率高达 0.04 mV,能够满足电路设计精度的要求;采用 ADR3425ARJZ 基准电压芯片(稳压精度高达±0.002 5 V)对 DAC8830 的 REF 引脚进行 2.5 V 高精度稳压,保障了电压信号的稳定传输。

2.2.3 电压电流转换电路

电压电流转换电路图如图 2 所示。

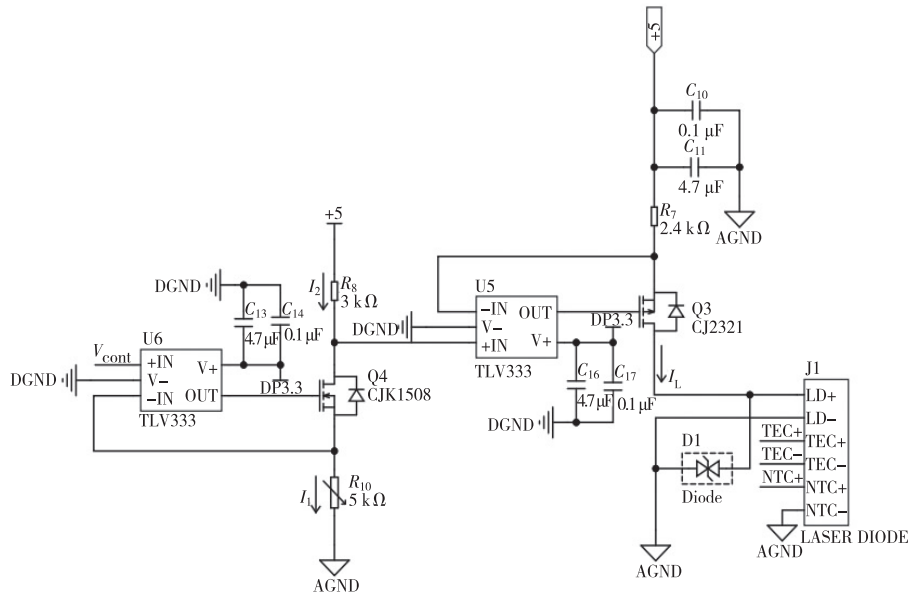


图 2 电压电流转换电路图
Fig. 2 Diagram of voltage-to-current conversion circuit

电路结构由 CMOS 运算放大器 (型号为 TLV333) 和 MOS 管等器件组成,其中 CMOS 运算放大器具有稳定的噪声特性。N-MOS 管和 P-MOS 管型号分别为 CJK1508 和 CJ2321,这 2 种器件的低阈值导通电压、低噪声特性能够满足高精度电路设计要求。同时,为了防止环境电磁场的等效介质电流破坏 VCSEL 激光器,在激光器正极端并联 1 个 3.6 V 稳压管作为限压保护。

根据运算放大器和 MOS 管的性质,在第一级放大电路中,流经 R_{10} 的电流 i_2 、MOS 管的漏极电压 V_2 ,其计算式如下:

$$\begin{cases} i_2 = i_1 = \frac{V_{\text{cont}}}{R_{10}} \\ V_2 = V_{\text{cc}} - i_2 R_8 \end{cases} \quad (7)$$

式中: V_{cont} 为二进制数据信号电压, V; V_{cc} 为电源电压,取 +5 V。

根据式 (7) 得到第二级放大电路的输入电压 V_2 ,其计算公式如下:

$$V_2 = V_{\text{cc}} - \frac{R_8}{R_{10}} V_{\text{cont}} \quad (8)$$

则 VCSEL 激光器输入电流 i_L 计算式如下:

$$i_L = \frac{V_{\text{cc}} - V_2}{R_7} = \frac{R_8}{R_{10}} \frac{V_{\text{cont}}}{R_7} \quad (9)$$

式中: R_7 、 R_8 为电阻, kΩ; R_{10} 为滑动变阻器电阻, kΩ。

2.2.4 软启动开关电路

软启动开关电路图如图 3 所示。

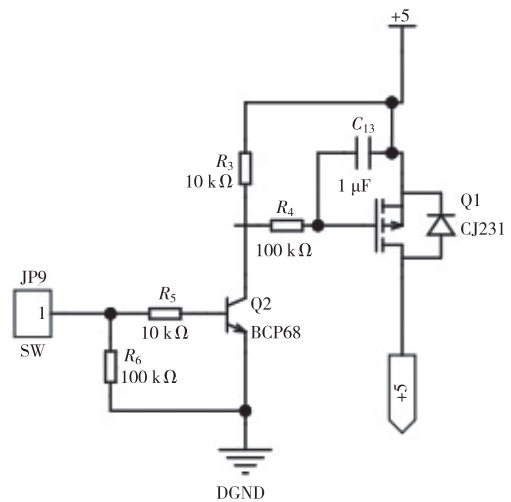


图 3 软启动开关电路原理图
Fig. 3 Schematic diagram of soft-start switch circuit

工作原理:当 SW 端口输出高电平时,NPN 三极管导通,MOS 管栅极为低电平,软启动开关电路导通;当 SW 端口输出低电平时,NPN 三极管关断,MOS 管栅极为高电平,软启动开关电路关断,以此实现开关功能。

未接通软启动开关电路时,电压从 0 V 阶跃至 +5 V;接通软启动开关电路时,根据电容的电流电压方程 $i = C \frac{du}{dt}$ 可知,电容两端电流与电压随时间的变化量成正比。激光器导通时间由电容 C_{13} 和电阻 R_4 决定,电容 C_{13} 的充电时间常数为 $\tau = R_4 C_{13}$,运用 Multisim 对软启动开关电路进行模拟仿真,得到供电电压曲线如图 4 所示。

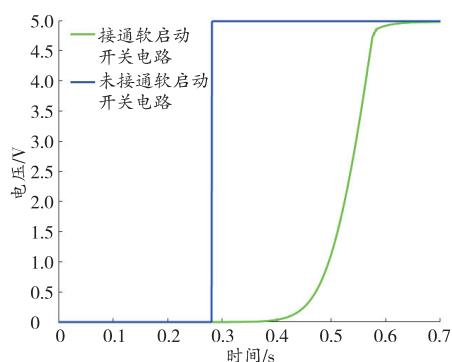


图 4 供电电压对比图
Fig. 4 Comparison diagram of supply voltage

由图 4 可知,电容充满电需要 3~5 个时间常数。设置 R_4 为 100 k Ω 、 C_{13} 为 1 μ F, +5 V 完全供电时间延长至约 0.3 s。

2.3 温控电路

当 VCSEL 激光器温度变化时,输出光波长随之发生改变,导致气体检测精度下降。为了降低温度变化对检测精度的影响,选用 ADN8834 热电冷却控制器,设计了一种基于 DAC 目标温度控制和 PID 补偿的温控电路。其工作原理为:①将 VCSEL 激光器负温度系数热敏电阻值 (Negative Temperature Coefficient, NTC) 转化为对应的电压信号,并设置参考电压信号作为差分电路的输入端,差分电路输出激光器管芯温度参考电压;②设置目标温度电压,该电压与激光器管芯温度参考电压共同作为 PID 补偿电路的输入端, PID 补偿电路将电压信号输出至控

制器;③控制器根据电压信号控制 TEC 驱动器选择 PWM 驱动方式或线性驱动方式,以此决定 TEC 的电压、电流大小和方向。

2.3.1 DAC 目标温度控制电路

在 DAC 目标温度控制电路中,将电压上限阈值设置为 V_{REF} ,根据主控芯片输出的 16 位二进制数将目标温度转化成相应的电压值,从而达到设定目标温度点的目的。分压电路由滑动变阻器 R_{14} ,电阻 R_{15} 、 R_{16} , NTC 构成,该电路将 VCSEL 激光器管芯温度转化成电压信号输入至温度差分放大电路中,得到激光器管芯温度参考电压。DAC 目标温度控制电路设计图如图 5 所示。

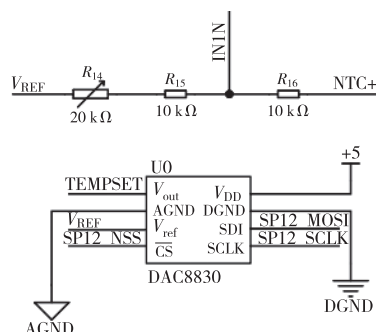


图 5 DAC 目标温度控制电路设计图
Fig. 5 Diagram of target temperature control circuit

2.3.2 PID 补偿电路

PID 补偿电路是自动温度控制的关键,其电路设计图如图 6 所示。

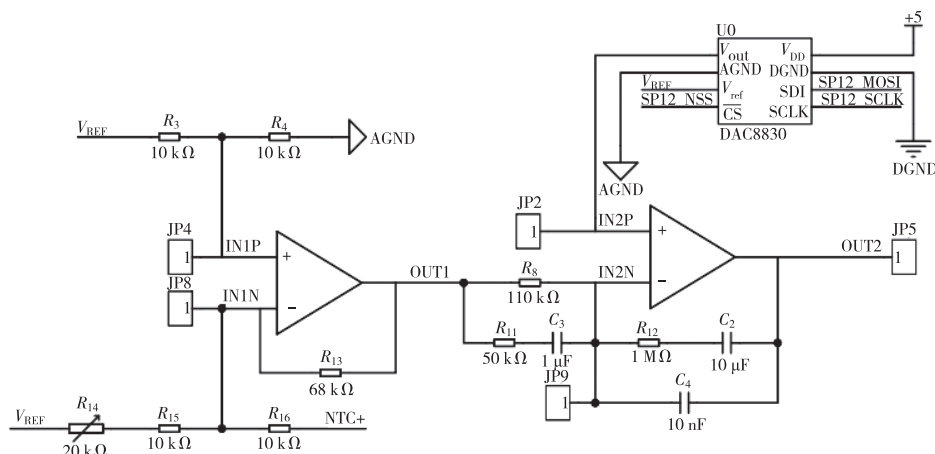


图 6 PID 补偿电路设计图
Fig. 6 Diagram of PID compensation circuit

将目标温度电压、激光器管芯温度参考电压输入到 PID 补偿电路中,其计算公式如下:

$$U = K_p e + T_1 \int_0^t e d\tau + T_D \frac{de}{dt} \quad (10)$$

式中: K_p 为比例参数; e 为电压差, V; T_1 为积分参数;

T_D 为微分参数。

由图 6 可以看出,由电阻 R_8 、 R_{11} 、 R_{12} 和电容 C_2 、 C_3 、 C_4 构成了 PID 补偿电路。其中,电容 C_4 可防止高频分量放大倍数饱和。因此,式 (10) 可表示如下:

$$\begin{cases} K_p e = -\left(\frac{R_{12}}{R_8} + \frac{C_3}{C_2}\right) u_{TREF} + \frac{R_{12}}{R_8} U_T \\ T_1 \int_0^t e d\tau = -\frac{1}{C_2 R_8} \int_0^t (u_{TREF} - U_T) d\tau \\ T_D \frac{de}{dt} = -C_3 R_{12} \frac{d(u_{TREF} - U_T)}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

式中: u_{TREF} 为激光器管芯温度参考电压; U_T 为目标温度电压; R_8 、 R_{12} 为电阻; C_2 、 C_3 为电容。

由式(11)可知, PID 补偿电路输出电压由目标温度电压和激光器管芯温度参考电压共同控制。

采用 MATLAB SIMULINK 对 PID 补偿电路进行仿真测试。由器件说明书可知, TEC 控制电路的增益控制到 5 V/V, 激光器时间常数为 10 s, 则该 PID 温度控制电路的开环传递函数 $G_c(s)$ 表达式如下:

$$\begin{aligned} G(s) &= G_c(s)H(s) \\ &= \frac{50(10s+1)(0.15s+1)}{s(0.05s+1)(0.01s+1)(10s+1)} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $H(s)$ 为反馈函数; s 为拉普拉斯参数。

其波特图及稳定裕度分析如图 7 所示。

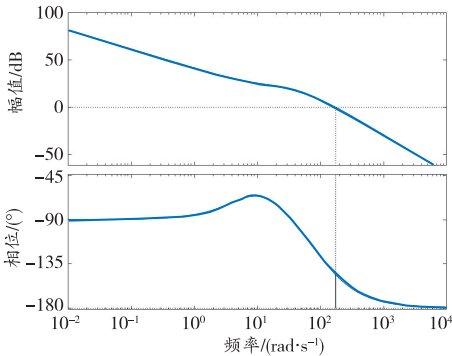


图 7 波特图及稳定裕度分析

Fig. 7 Diagram of PID compensation circuit

由图 7 可知, 系统幅值裕度 G_m 为无穷大, 最小相角裕度 P_m 为 51.5°, 温度最终趋于稳定。

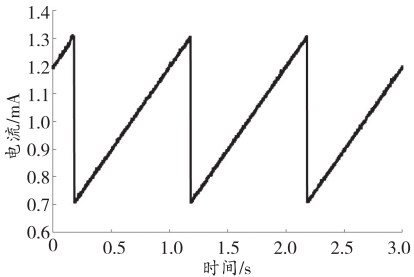
3 实验结果

3.1 驱动稳定性测试

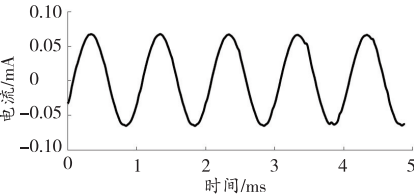
选取近红外区域氧气吸收谱线波长 760.46 nm 作为波长调制中心, 选取低频锯齿波和高频正弦波的叠加信号作为波长调制信号, 完成对氧气浓度的精准检测。为保障煤矿氧气浓度检测的实时性, 锯齿波频率一般选择几赫兹到几十赫兹, 正弦波频率一般选择几千赫兹到几十千赫兹。调节滑动变阻器控制激光器阈值电流大小, 令驱动电路分别输出 1、2、5、10 Hz 锯齿波波形和 1、2、5、10 kHz 正弦波波形。应用 LeCroy T3DSO1000 系列示波器采集 2 种

波形信号, 可实现每秒采样 2×10^9 个点, 能够满足实验需求。

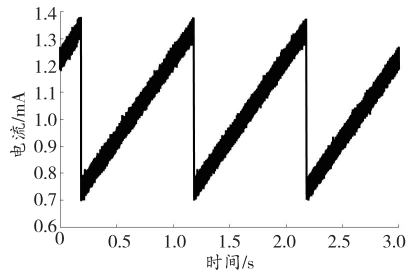
示波器采集的 1 Hz 锯齿波如图 8(a) 所示, 1 kHz 正弦波如图 8(b) 所示, 叠加波形如图 8(c) 所示。



(a) 锯齿波



(b) 正弦波



(c) 叠加波形

图 8 实验波形

Fig. 8 Experimental waveforms

由图 8(c) 可知, 当滑动变阻器的阻值为 2 kΩ 时, 该电路可输出的驱动电流为 0.680~1.370 mA, 包含了 0.750~1.250 mA 的电流调谐范围, 初步达到了检测标准。统计锯齿波频率及正弦波频率实测数据, 结果见表 2。

表 2 锯齿波及正弦波频率数据

Table 2 Data sheet of sawtooth and sine wave frequency

波形类型	理论频率/Hz	实测频率/Hz	频率误差/%
锯齿波	1	1.00	0
	2	1.99	0.50
	5	4.99	0.20
	10	9.98	0.20
正弦波	1 000	999.00	0.10
	2 000	1 999.00	0.05
	5 000	4 998.00	0.04
	10 000	9 996.00	0.04

由表 2 可知,该电路板实现的锯齿波频率误差小于 0.5%;正弦波频率误差小于 0.1%,说明驱动电流输出频率稳定。

3.2 温度控制精度测试

激光器工作时,通过 DAC 目标温度控制电路将激光器目标温度设定在 35.0 ℃。待激光器温度稳定后,通过万用表测量温控电路中分压电路的电压值计算激光器 NTC 热敏电阻值。NTC 热敏电阻与激光器温度关系如下:

$$R_{NTC} = R_{T_0} \exp \left[B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (13)$$

式中: R_{T_0} 为室温条件下的 NTC 热敏电阻值,取 10 kΩ; B 为热敏指数,取值通常为 3 950 K; T 为激光器工作温度,K; T_0 为室内热力学温度,取 298.15 K。

设置采样点的采样时间间隔为 5 min,采样时间 150 min,温度采样曲线如图 9 所示。

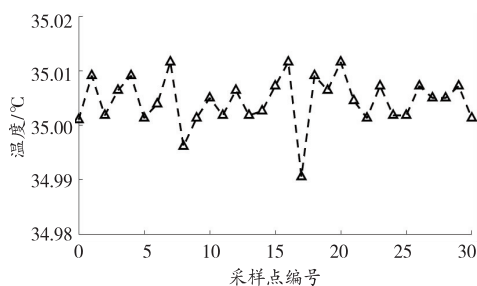


图 9 温度采样曲线
Fig. 9 Temperature sampling curve

由图 9 可知,温度控制精度为 ± 0.012 ℃,满足了激光器温度控制要求。

3.3 激光器驱动及温控电路整体稳定性测试

为了获取波长扫描精度,通过氧气吸收双峰谱线进行反算。设氧气吸收双峰谱线的波长间隔为 $\Delta\lambda$,该间隔内采样点为 N ,电流幅值之差为 ΔI ,则电流扫描精度计算公式如下:

$$\Delta I = \frac{\Delta\lambda}{\delta_I N} \quad (14)$$

式中 δ_I 为电流调谐系数,nm/mA。

查询 HITRAN 数据库可知,接近 760.46 nm 吸收峰的最近可检测双峰分别在 761.18、761.10 nm 处。通过调节激光器控制温度,以该双峰结构作为波长调制对象进行扫描。在信号发生程序中设置单周期正弦波检测点数为 32,得到 760.10、760.18 nm 氧气双吸收峰检测波形,如图 10 所示。

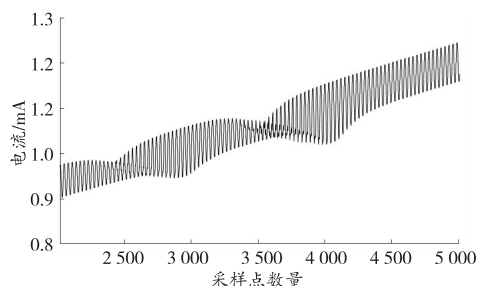


图 10 760.10、760.18 nm 氧气双吸收峰检测波形
Fig. 10 Double oxygen peaks waveform detection on 760.10 nm and 760.18 nm

由图 10 可知,在氧气最大吸收谱线之间的检测点数约有 1 152 个,波长跨度为 0.08 nm,则波长检测精度平均为 0.07 pm(小于 0.10 pm),由式(14)计算可得电流扫描精度为 0.12 μ A,满足 VCSEL 激光器的电路设计要求。

为了验证 VCSEL 激光器驱动电流信号的稳定性,调节目标温度使激光器扫描 760.46 nm 氧气吸收峰,以 1 Hz 频率采集最大氧气吸收采样点处的电流幅值。最大氧气吸收电流幅值曲线如图 11 所示。

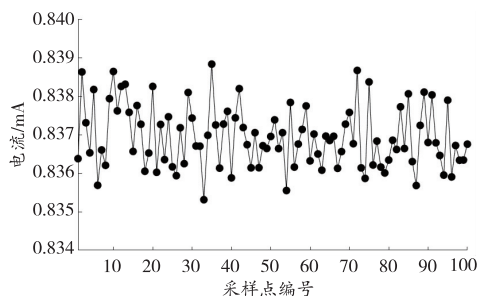


图 11 最大氧气吸收电流幅值曲线
Fig. 11 Current amplitude curve of maximum oxygen absorption

从图 11 中可以看出,受温度和环境噪声影响,激光器电流波动最大幅值为 4 μ A,根据电流调谐系数,该值对应于波长最大波动 2.40 pm,驱动电流整体稳定性良好,达到了 VCSEL 激光器的驱动电路设计标准。

4 结论

采用 GD32F303RCT6 微控制器和 ADN8834 热电冷却控制器,设计了一种 TDLAS 煤矿氧气检测系统高精度 VCSEL 驱动及温控电路,实验结果表明:

- 1) 软启动开关电路使 VCSEL 激光器供电时间延长至 0.3 s,有效抑制了冲击电流的火花效应,保障了安全。
- 2) 驱动电路输出锯齿波频率误差小于 0.5%,正弦波频率误差小于 0.1%;激光器输出电流扫描区

为 0.680 ~ 1.370 mA, 该区间包含了 0.750 ~ 1.250 mA, 将整个电路接入 TDLAS 氧气检测系统中得到波长扫描精度为 0.07 pm (小于 0.10 pm), 电流扫描精度为 0.12 μ A, 能够准确扫描到 760.46 nm 吸收峰, 满足 VCSEL 激光器驱动电路的高精度设计要求。

3) 温控电路设计了一种 PID 控制电路和 DAC 目标温度控制电路, 其温度控制精度达到了 ± 0.012 $^{\circ}$ C, 满足 VCSEL 激光器温控电路的高精度设计要求。

4) 为了验证驱动电流信号的稳定性, 对最大氧气吸收采样点的电流幅值进行取样, 得到氧气最大吸收点的波长最大波动为 2.40 pm, 驱动电流稳定性良好, 满足了 TDLAS 氧气检测系统的设计需求。

参考文献 (References):

- [1] 张静静, 沈越, 刘文武, 等. 中枢神经系统氧中毒发生机制及防治措施[J]. 第二军医大学学报, 2021, 42(4): 426-431.
ZHANG Jingjing, SHEN Yue, LIU Wenwu, et al. Pathogenesis and prevention of central nervous system oxygen toxicity[J]. Academic Journal of Second Military Medical University, 2021, 42(4): 426-431.
- [2] 张涛, 曹阳, 赵会义. 缺氧对粮库进仓人员危害的探讨[J]. 粮油食品科技, 2014, 22(1): 130-132.
ZHANG Tao, CAO Yang, ZHAO Huiyi. Discussion on the harm of hypoxia to the personnel entering the grain depot[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2014, 22(1): 130-132.
- [3] 王璐. 一种具有温度和压力补偿的高精度矿用氧气传感器的研制[J]. 能源技术与管理, 2019, 44(6): 1-3.
WANG Lu. Study on a high-accuracy mineral oxygen sensor with the complement for temperature and pressure[J]. Energy Technology and Management, 2019, 44(6): 1-3.
- [4] 梁运涛, 田富超, 冯文彬, 等. 我国煤矿气体检测技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1701-1714.
LIANG Yuntao, TIAN Fuchao, FENG Wenbin, et al. Research progress of coal mine gas detection technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1701-1714.
- [5] 张远征. 基于温度自适应补偿技术的氧气传感器的研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(5): 8-11.
ZHANG Yuanzheng. Research on oxygen sensor based on adaptive temperature compensation technology[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2021(5): 8-11.
- [6] 贾传武. 基于荧光淬灭的光纤氧传感器中相位解调方法及稳定性和重复性研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [7] 龚仲强, 李军, 张书林, 等. 氧气浓度和温度检测系统研究[J]. 工矿自动化, 2015, 41(10): 20-23.
GONG Zhongqiang, LI Jun, ZHANG Shulin, et al. Research of oxygen concentration and temperature detection system[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(10): 20-23.
- [8] 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(1): 22-25.
LU Hongfei, WANG Biao, FAN Xinglong, et al. Design of driving circuit for VCSEL laser of NH_3 gas detector based on TDLAS technology[J]. Laser Journal, 2019, 40(1): 22-25.
- [9] 聂伟, 阚瑞峰, 杨晨光, 等. 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(9): 9-29.
- NIE Wei, KAN Ruifeng, YANG Chenguang, et al. Research progress on the application of tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 9-29.
- [10] WELDON V, O' GORMAN J, PÉREZ-CAMACHO J J, et al. Laser diode based oxygen sensing: A comparison of VCSEL and DFB laser diodes emitting in the 762 nm region[J]. Infrared Physics & Technology, 1997, 38(6): 325-329.
- [11] 钟奇润, 姜海明, 戴俊珂, 等. 半导体激光器控制器的发展现状[J]. 光通信技术, 2016, 40(5): 52-54.
ZHONG Qirun, JIANG Haiming, DAI Junke, et al. Development situations of semiconductor laser controllers[J]. Optical Communication Technology, 2016, 40(5): 52-54.
- [12] 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): 144-151.
YANG Tao, LI Wusen, CHEN Wenjian. Design of new-style driving and temperature control circuit for low power diode laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(2): 144-151.
- [13] 王金城, 梁运涛, 田富超. TDLAS 气体检测技术研究现状及其在煤矿中的应用[J]. 煤矿安全, 2022, 53(11): 98-102.
WANG Jincheng, LIANG Yuntao, TIAN Fuchao. Research current situation of TDLAS gas detection technology and its application in coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(11): 98-102.
- [14] 辛文辉, 任卓勇, 樊建鑫, 等. 基于 FPGA 的 TDLAS-WMS 信号控制系统设计及实现[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(5): 373-380.
XIN Wenhui, REN Zhuoyong, FAN Jianxin, et al. Design and implementation of a field programmable gate array-based signal control system for tunable diode laser absorption spectroscopy-wavelength modulation spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(5): 373-380.
- [15] SHAO L G, FANG B, ZHENG F, et al. Simultaneous detection of atmospheric CO and CH_4 based on TDLAS using a single 2.3 μm DFB laser[J]. Spectrochimica Acta Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2019, 222: 117118.
- [16] 庞涛. 工业过程气体在线监测技术研究与系统设计[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [17] 张瑞林. TDLAS 气体传感器中基于小波变换的检测技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- [18] 王彪, 鹿洪飞, 李奥奇, 等. 采用 VCSEL 激光光源的 TDLAS 甲烷检测系统的研制[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 131-137.
WANG Biao, LU Hongfei, LI Aoqi, et al. Research of TDLAS methane detection system using VCSEL laser as the light source[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 131-137.
- [19] HOSSEINZADEH SALATI S, KHORSANDI A. Apodized 2f/1f wavelength modulation spectroscopy method for calibration-free trace detection of carbon monoxide in the near-infrared region: Theory and experiment[J]. Applied Physics B, 2014, 116(3): 521-531.
- [20] 何岸, 陈雅茜, 郭敬远, 等. 基于激光吸收光谱法的煤矿硫化氢检测[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(3): 113-117.
HE An, CHEN Yaxi, GUO Jingyuan, et al. Detection of hydrogen sulfide in coal mine based on laser absorption spectrometry[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(3): 113-117.
- [21] 李祥和. 工频变压器冲击电流抑制电路的设计[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(4): 63-65.
LI Xianghe. Design of impulse current suppression circuit for power frequency transformer[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2018, 45(4): 63-65.

(责任编辑: 林桂玲)