

· 光电测量与检测 ·

用于人体呼气检测中 CH_4 气体检测的激光器温控系统设计俞泳波^{1,3}, 王彪¹, 张瑞^{1,2}, 程林祥^{1,2}, 连厚泉^{1,3}, 戴童欣^{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: 人体呼气检测是一种便捷有效的临床诊断手段, 通过检测人体呼出气体中 CH_4 浓度能够实现消化科、内分泌科等领域的疾病的无损检测。使用 TDLAS 技术进行人体呼气检测是一种精确、便捷的检测方法。针对 TDLAS 型 CH_4 气体检测系统, 本文设计了基于 FPGA 的激光器温控系统。系统选用 XC6SLX25 为主控芯片, 主控制器通过模数转换芯片 AD7691 实时获取激光器的温度, 将实际温度与设定温度进行数字 PID 运算后, 改变数模转换电路输出的电压控制 TEC 驱动芯片 AND8835 实现对激光器温度的控制。经过试验测试, 该温控系统可以高效、精确、快速的对激光器进行温度控制, 控温精度达到 $\pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 。

关键词: TDLAS; 呼气检测; CH_4 ; 温度控制; ADN8835

中图分类号: TN271.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.14016/j.cnki.jgzz.2022.01.008

Design of laser temperature control system for CH_4 gas detection in human breath testYU Yongbo^{1,3}, WANG Biao¹, ZHANG Rui^{1,2}, CHENG Linxiang^{1,2},
LIAN Houquan^{1,3}, DAI Tongxin^{1,3}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: The human breath test is a convenient and effective clinical diagnosis method. By detecting the concentration of CH_4 in the human exhaled air, non-destructive detection of diseases in gastroenterology, endocrinology and other fields can be realized. The use of TDLAS technology for human breath detection is an accurate, convenient detection method. Aiming at the TDLAS type CH_4 gas detection system, this article designs a laser temperature control system based on FPGA. The system uses XC6SLX25 as the main control chip. The main controller obtains the temperature of the laser in real time through the analog-to-digital conversion chip AD7691. After the actual temperature and the set temperature are subjected to digital PID calculation, the voltage output of the digital-to-analog conversion circuit is changed to control the TEC driver chip AND8835 realizes the control of laser temperature. After experimental tests, the temperature control system can efficiently, accurately and quickly control the temperature of the laser, with a temperature control accuracy of $\pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}$.

Key words: TDLAS; Breath test; CH_4 ; temperature control; ADN8835

收稿日期: 2021-11-14

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)

作者简介: 俞泳波 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事嵌入式系统软硬件方面研究。E-mail: 1608855234@qq.com

通信作者: 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

1 引言

呼气检测是一种通过分析人体呼出气体成分、酸碱度等性质, 实现某些疾病的无损检测的一种诊断手段。其中甲烷呼气检测在临床上被广泛应用于消化科、血管科、内分泌科等领域, 同时在诊断与小肠细菌

<http://www.laserjournal.cn>

过度生长相关疾病,以及乳糖不耐受、果糖不耐受、蔗糖不耐受等方面,也具有诊断意义^[1]。因此,实现对人体呼出气体中 CH₄ 浓度检测具有非常重要的现实意义。

目前,用于人体呼气检测的传统方法主要有气相色谱法、电化学法等^[2-3]。传统方法设备昂贵、检测精度低、使用操作方法复杂、维护保养费用高^[4],这些因素限制了呼气检测的临床应用。近年来 TDLAS 气体检测技术已经成为了气体检测的一种重要的检测手段。将 TDLAS 气检测技术应用在人体呼气检测中,能够提高检测的精度,加快检测速度,同时降低检测成本,有利于呼气检测的进一步推广^[5]。

TDLAS 气体检测技术需要根据被测气体的光谱特性选择相应波长的激光器^[6],CH₄ 的红外光谱在 1 654 nm 附近具有一个非常明显的吸收峰,且该吸收峰附近无其它气体吸收峰能够对其产生干扰,因此选取 1 654 nm 的 DFB 激光器。DFB 激光器可以根据电流进行调谐,在工作过程中会导致温度变化,温度变化会导致激光器的波长产生漂移^[7],这会影响系统的检测精度。为了保证激光器工作过程中输出波长的稳定,需要对激光器的温度精确控制^[8]。

本文设计了一种用于 TDLAS 气体检测技术的 DFB 激光器的温控系统,实现对激光器的恒温控制,具有控制精度高,控温范围大,控温速度快等特点。

2 系统整体方案设计

系统由 5 个部分组成:基于 XC6SLX25 芯片的 FPGA 的主控模块、热电制冷器、数模转换电路、模数转换电路、用于检测 CH₄ 气体的中心波长为 1 654 nm 的 DFB 激光器(封装内部集成有热电制冷器和热敏电阻)。

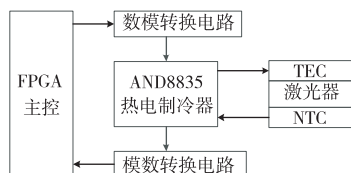


图1 系统整体框图

为了实现人体呼气检测中 CH₄ 气体检测系统的激光器的恒温控制,需要对激光器运行时的温度变化快速响应。由 FPGA 驱动 DAC 产生模拟电压,控制热电制冷器芯片 ADN8835 改变热电制冷器(TEC)两端电流的方向和大小,使 TEC 制冷或制热。ADN8835 芯片不仅实现 TEC 的驱动,同时还能够将 NTC 的电阻值转换为电压值。FPGA 主控驱动 ADC 芯片获取 NTC 电阻两端电压,根据获取的电压来换算得到激光

器的实际温度值。将实际温度值和设定温度值相减得到误差信号,通过 PID 算法进行运算得到新的 DAC 输出电压值,DAC 输出新的电压通过热电制冷器控制芯片改变 TEC 两端电流的大小和方向控制激光器的温度。在经过的闭环控制后,激光器温度会维持恒定。

3 硬件电路设计

3.1 主控电路

温控系统的主控选用 Xilinx 公司的 FPGA 芯片 XC6SLX25-2FTG256。该芯片内部具有 24 051 个逻辑单元(LE),926 个嵌入式存储器(Kbit),38 个 DSP 处理单元,2 个 CMT。通过丰富的硬件资源,可以用来驱动 ADC、DAC 芯片和进行 PID 计算,满足本系统的设计需求。

系统在运行时,主控 FPGA 通过外部 50 MHz 的晶振分频得到 100 Hz 的时钟信号,根据此时钟信号,每 10 ms 用 ADC 测量一次 NTC 电阻电压,根据电压计算出实际温度,并进行 PID 计算。PID 计算得到新的控制值,FPGA 主控会根据新的控制值更新 DAC 输出的电压,驱动 TEC 温度控制模块实现激光器恒温控制。图 2 为 FPGA 主控的系统框图。

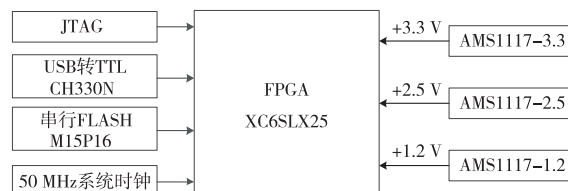


图2 FPGA 主控系统框图

3.2 TEC 控制电路

在 TDLAS 检测系统中,激光器工作时需要维持波长稳定^[9],而波长会受温度影响,因此要将激光器的温度精确的控制在一定范围内^[10]。本系统所选用的激光器内部有一个热电制冷器(TEC),TEC 是一种既可以制冷也可以制热的半导体器件。通过控制流过 TEC 的电流的方向实现制冷和制热。因此,需要设计驱动电路控制流过 TEC 的电流。

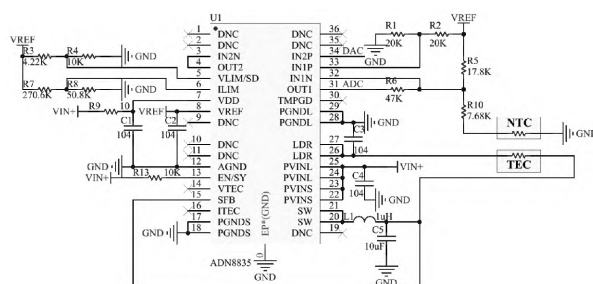


图3 TEC 控制电路

TEC 控制电路采用热电冷却器控制器芯片 ADN8835。芯片内部集成了低导通内阻的 MOSFET,采用高效的单电感结构。ADN8835 使用了独特的线性功率级和脉宽调制控制级相结合的结构,共同工作实现对芯片内部 H 桥 MOSFET 的控制,实现最大 3A 电流的输入输出。此外,芯片具有最大输出电流和最大输出电压限制功能,通过配置电阻可以限制电路输出的电流和电压,防止 TEC 的温度过高或过低损坏激光器。

ADN8835 支持模拟 PID 控制和数字 PID 控制两种方式控制 TEC 温度,为了使系统应用更加灵活,采用数字 PID 控制方式。通过内部集成的放大器和 2.5 V 电压基准将 NTC 电阻的阻值转换为线性电压输出,由 ADC 读取电压值,在 FPGA 主控内部转换为实际的温度。然后经过 PID 运算后,FPGA 主控通过改变 DAC 输出电压的大小来改变 ADN8835 输出的电流的大小和方向,实现控温。

3.3 数模转换电路

用于 TDLAS 检测技术的激光器在不同情况下工作温度不同^[11],为了适应激光器在检测系统中的应用,温控电路的控制范围要足够大^[12]。同时,为了实现快速响应,使控温精度更加精确,选择模数转换芯片 DAC8811,通过精密运放 OPA277 将输出的电流信号转化为电压信号。数模转换电路如图 4 所示。

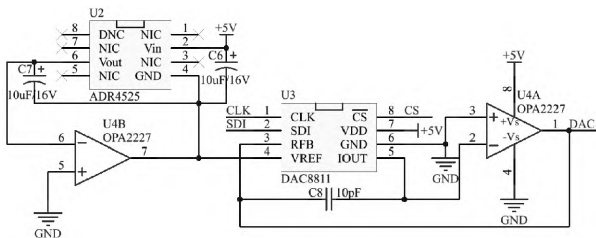


图 4 数模转换电路

DAC8811 具有 16 位分辨率,建立时间 0.5 μs,积分线性度 1LSB,具有精度高、速度快的优点。通过数模转换电路输出的电压信号控制 ADN8835 输出,改变流过 TEC 两端电流。

3.4 模数转换电路

用于 TDLAS 气体检测系统的激光器内部都集成有电阻式的温度传感器 (NTC),在 25 ℃ 时阻值为 10 kΩ,随着温度的上升温度传感器的阻值会下降。通过测量温度传感器的阻值,可以得到激光器工作时的温度。系统使用 ADN8835 内部集成 2.5 V 基准源和零漂移轨对轨斩波放大器组成惠斯通电桥,将温度传感器的阻值转化为电压信号,再由模数转换电路读取该电压信号。

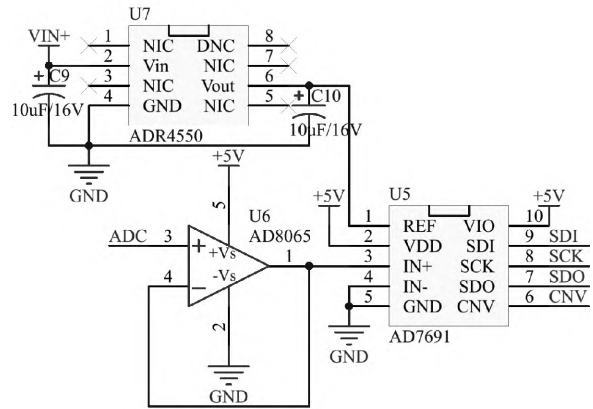


图 5 模数转换电路

模数转换电路选用 ADI 的 AD7691 芯片,其具 18 位无失码分辨率,转换速度最高可达 250 kSPS。能够保证采集到的温度的精确性的同时,快速的获取温度变化情况,使温控系统能够快速准确的将激光器温度控制到设定温度。

4 控制软件设计

系统的软件部分采用 PID 控制算法,通过对数模转换电路采集到的数据运算,将运算结果通过数模转换电路输出,达到控温的目的。其算法的公式可以表示为:

$$U(t) = k_p e_t + k_i \sum_{i=0}^k \text{err}(j) + k_d (e_t - e_{t-1})$$

其中, e_t 为当前误差值, e_{t-1} 为上一时刻误差, $\text{err}(j)$ 为累计误差, k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例、积分和微分系数。为了减少控制系统超调过大导致稳定时间过长的问題,在控制算法中引入对积分项的限幅,限制积分项的最大值和最小值,从而增强了系统的稳定性。

温控系统程序如框图 6 所示,系统通过串口配置目标温度。先驱动 DAC 输出一个初始的电压,控制流过 TEC 的电流的大小和方向。随后 FPGA 驱动 ADC 电路读取到当前激光器的实际温度,进行 PID 运算。以设定温度和当前温度的差值作为误差,根据已经设定好的比例系数、积分系数和微分系数算出下一次输出的 DAC 电压数值,最后驱动 DAC8811 输出电压改变 ADN8835 输出的电流,控制 TEC 实现激光器的恒温控制。

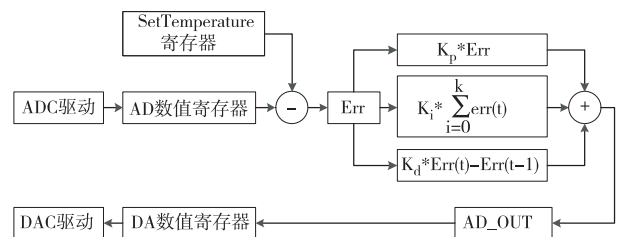


图 6 系统软件框图

为了方便调试和适应更多不同种类的激光器,还增加了串口模块,使系统可以通过上位机的串口设定温度和调整 PID 算法的参数。同时,还能够实时监测激光器的温度。图 7 为串口模块框图。

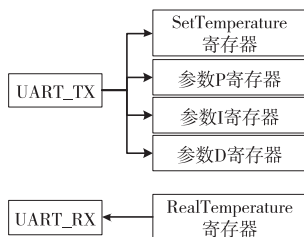


图 7 串口模块框图

5 实验结果与分析

在环境温度 20 ℃ 的情况下,设置 10 ℃,15 ℃,20 ℃,25 ℃,30 ℃,35 ℃,40 ℃,45 ℃ 共 8 个目标温度。系统通过串口将读取到的激光器温度发送到上位机。实际测量结果显示,在 10 ℃-40 ℃ 区间范围内,均能实现 ± 0.01 ℃ 的控温精度。图 8 给出了 25 ℃ 的温控测试曲线。

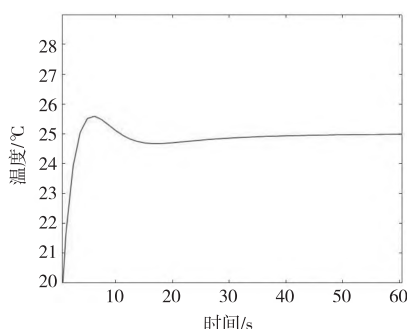


图 8 控温测试曲线图

图 9 是设定温度为 25 ℃ 时,控温系统达到稳定状态时激光器实际温度的波动情况。从图中可知,当系统处于稳定状态时,温度波动小于 ± 0.01 ℃。满足了 TDLAS 气体检测系统运行过程中维持激光器温度稳定的要求。

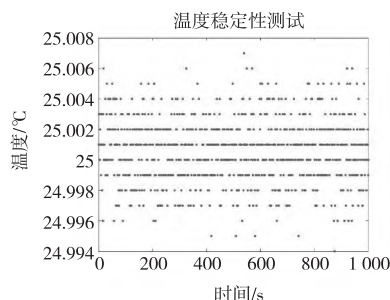


图 9 温度误差

6 结论

本文根据 TDLAS 检测技术原理,设计了一种用

于人体呼气实验中 CH₄ 气体检测的激光器温控系统。系统使用 FPGA 作为主控,驱动 ADC 电路读取当前激光器温度值,经过 PID 运算后再通过 DAC 电路控制热电冷却器芯片 ADN8835 驱动 TEC 调节激光器的温度。经过实际测试表明,在 0-40 ℃ 的控温范围内控温精度为 ± 0.01 ℃。实验证明,本文设计的温控系统可以满足人体呼气检测中 CH₄ 气体检测的要求,此系统也可应用于检测其它气体的 TDLAS 系统的激光器温控中。

参考文献

- [1] 朱星卓,赵董步甲,郑懿烜,宁炫,苑昊,吴春生. 呼气分析技术及其在临床诊断中的应用研究进展[J]. 中国生物医学工程学报,2021,40(01):107-117.
- [2] 袁世梅,杨伟,魏进武,廖俐雅,余登琼,左崇宇,余晓辉,宋仁,熊中政. 不同诊断方法对消化内科幽门螺杆菌感染的诊断价值[J]. 检验医学与临床,2021,18(13):1948-1951.
- [3] 李金义,田鑫丽,樊鸿清. 呼出气体中内源性丙酮的激光光谱检测[J]. 激光杂志,2018,39(10):28-34.
- [4] 张晨生,陆宁,闫梦,武一,花中秋. 糖尿病呼气检测分析仪设计[J]. 河北工业大学学报,2021,50(04):25-30+37.
- [5] 范兴龙,王彪,许玥,张国军,鹿洪飞,李奥奇. 用于 CO₂ 气体检测的 VCSEL 激光器温控系统设计[J]. 激光杂志,2018,39(11):18-21.
- [6] 王琳琳,贾明. TDLAS 技术气体检测二次谐波信号的仿真与分析[J]. 激光杂志,2020,41(03):25-28.
- [7] Perlitz Julian F. A., Bro Heiko, Will Stefan. Measurement of Water Mole Fraction from Acoustically Levitated Pure Water and Protein Water Solution Droplets via Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) at 1.37 μm [J]. Applied Sciences,2021,11(11):11-17.
- [8] 王彪,范兴龙,戴童欣,连厚泉,黄硕,李奥奇,许玥. 用于乙炔气体检测的卡尔曼滤波式激光温控系统[J]. 激光杂志,2019,40(06):10-13.
- [9] 窦贺鑫,汪. 基于 TDLAS 技术的在线气体检测系统评介[J]. 现代仪器与医疗,2007,13(6):52-54.
- [10] So Sunghyun, Jeong Nakwon, Song Aran, Hwang Jungho, Kim Daehae, Lee Changyeop. Measurement of Temperature and H₂O Concentration in Premixed CH₄/Air Flame Using Two Partially Overlapped H₂O Absorption Signals in the Near Infrared Region[J]. Applied Sciences,2021,11(8):107-112.
- [11] 王鑫,荆聪蕊,侯凯旋,张建涛,姜存广,姚建铨,刘秀玲. 基于 TDLAS 技术的人体呼气末 CO₂ 在线检测[J]. 中国激光,2020,47(03):298-304.
- [12] 王彪,范兴龙,戴童欣,连厚泉,黄硕,李奥奇,许玥. 用于乙炔气体检测的卡尔曼滤波式激光温控系统[J]. 激光杂志,2019,40(06):10-13.