2023年10月

October, 2023

・激光物理与器件・

基于 Zynq 的 TDLAS 激光器温度控制系统研究

王 彪¹,张 瑞^{1,2},尹红贺³,王志哲^{1,2}
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吉光半导体科技有限公司,长春 130031

摘 要:针对使用 TDLAS 技术检测 CO₂ 气体,本文设计了基于 Zynq 的激光器温控系统。系统选用 XILINX -7000 系列 XC7Z020 芯片作为主控单元,利用其独特的 PS(Processing System)和 PL(Programmable Logic)架构,使用 PS 端的 FPU(floating point unit)进行浮点数据运算,通过 Block RAM 共享片内数据缓存,使得 PL 端可以直接获取 PS 端数据并进行高速 PID 运算。主控单元通过驱动 AD7124-4 芯片获得激光器的实时运行温度,将实际温度与目标温度进行高速 PID 运算后得到 TEC 驱动信号,改变 TEC 芯片 LT8722 的输出电压值,实现对激光器温度的动态调节。经过实际测试,该系统可以稳定、高速的对激光器进行温度控制,控温精度可达到±0.01 ℃。

关键词:TDLAS; Zynq; CO₂; PID 控制 中图分类号:TN271.5 文献标识码:A doi:10.14016/j.cnki.jgzz.2023.10.006

Research on temperature control system of TDLAS laser based on Zynq

WANG Biao¹, ZHANG Rui^{1,2}, YIN Honghe³, WANG Zhizhe^{1,2}

 ¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese; Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Jlight Semiconductor Technology Co., Ltd. Changchun 130031, China

Abstract: For the detection of CO_2 gas using TDLAS technology, this paper designs a laser temperature control system based on Zynq. The system selects XILINX-7000 series XC7Z020 chip as the main control unit, utilizes its unique PS (Processing System) and PL (Programmable Logic) architecture, uses the FPU (floating point unit) at the end of the PS to carry out floating-point data operation, and shares the on-chip data cache via Block By sharing the on -chip data cache through Block RAM, the PL side can directly obtain the data from the PS side and perform high-speed PID operations. The master control unit obtains the real-time operating temperature of the laser by driving the AD7124-4 chip, and then obtains the TEC drive signal after high-speed PID operation between the actual temperature and the target temperature, and changes the output voltage value of the TEC chip LT8722 to realize the dynamic adjustment of the laser temperature. After actual testing, the system can be stable, high-speed temperature control of the laser, temperature control accuracy of ± 0.01 °C.

Key words: TDLAS; Zynq; CO₂; PID control

1 引言

二氧化碳气体作为大气组成的一部分之一,利用 监测装备对大气二氧化碳碳通量变化实现长期原位

收稿日期:2023-04-21 基金项目:吉林省科技发展计划重点科技研发项目(No.20220203016SF) 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 精准监测,实现陆地生态系统碳通量智能评估,辨析 影响碳源、汇的主控因素,为我国碳中和策略提供理 论和数据支撑^[1-3]。目前 TDLAS 技术因为其从气体 检测原理上决定了其可以采用唯一的吸收峰进行高 选择性检测,同时具有检测精度高、速度快、无消耗性 耗材等突出优点^[4],比较适用于深地资源勘探领域的 气体检测。

常用的 TDLAS 气体检测激光器有 DFB(分布反

馈式)激光器^[5]、VCSEL(垂直腔面发射半导体)激光器^[6-7]。根据 HITRAN 数据库提供的 CO₂ 气体吸收 峰强度情况,系统选用 2 682 nm 波长的激光器作为光 源。DFB 激光器具有非常好的单色性和高边模抑制 比,根据二氧化碳气体检测的实际需求,本文研制了 一种基于中红外 DFB 激光器的温度控制系统。

在面对外部环境的干扰时,传统的激光器温度控制系统无法达到理想的高速控制效果^[8]。本文利用 Zynq芯片独特的 PS 和 PL 架构,设计使用 PS 端对浮 点数据进行运算,通过 BRAM 共享片内数据缓存,使 得 PL 端可以直接获取数据并进行高速 PID 温控,实 现对激光器温度的高速控制^[9-10]。

2 系统整体设计

系统由 4 个部分组成:基于 XILINX - 7000 系列 XC7Z020 芯片的 Zynq 主控模块、TEC 驱动模块、温度 采集单元和用于检测 CO₂ 气体的中红外 DFB 激光 器。激光器内部已经集成了 TEC (Thermoelectric cooler)和 NTC (Negative Temperature Coefficient thermistor)



图1 系统整体框图

为了使系统在各种复杂环境下能够稳定驱动中 红外 DFB 激光器以检测二氧化碳气体浓度,需要激 光器的工作温度能够长期保持稳定。由 Zynq 主控单 元设置激光器的工作温度和初始 PID 参数,并控制 LT8722 芯片驱动半导体制冷器,通过改变 TEC 两端 的电流方向和大小,以此实现对激光器运行温度的初 始控制。之后以 AD7124-4 为核心搭建温度采集单 元,将 DFB 激光器内部的 NTC 阻值转换为激光器的 实际运行温度。Zynq 主控单元将温度反馈情况同设 定目标温度进行高速 PID 运算后,得到新的 TEC 驱 动信号,重新控制激光器的工作温度。在经过多次反 馈控制后,激光器的温度最终会稳定在设定值。同 时,系统会以日志的形式将激光器的实际运行温度实 时存储到外部 SD 卡中。

3 电路设计

3.1 主控电路

主控系统选用 Xilinx 公司的 XC7Z020 芯片。该

芯片 PS 端的两个 ARM Cortex-A9 内核都具有 FPU (浮点运算单元),可以满足温度控制系统中的浮点运 算要求。PL 端具有多达 220 个 DSP 运算单元,能够 实现多种乘法或者卷积函数运算。同时 7020 芯片内 部共有 140 个 BRAM,每一块 BRAM 的大小为 36 Kb, 片上总存储可达 4.9 Mb,并且每一个 BRAM 都有两 个共享数据的独立端口,PS 端和 PL 端都可以访问, 为温控数据计算提供了足够的内存空间。满足本系 统的设计需求。

系统初始运行时,需要设定激光器运行温度和 相应 PID 参数。PS 端通过浮点运算将温度信息和 NTC 的电阻值进行函数映射;同时在确定温度采集电 路输出电压恒定的情况下,将采集到的 NTC 两端电 压值转换为 NTC 阻值,实现 NTC 电压和温度的一一 对应关系;PL 端直接通过 NTC 两端电压值进行 PID 控制,调节 TEC 驱动芯片输出的电压,实现对激光器 的恒温控制。最后,将激光器的运行温度数据存储到 外部 SD 卡中。图 2 为 Zynq 主控系统框图。



图 2 Zynq 主控系统框图

3.2 TEC 驱动电路

系统采用 TDLAS-WMS(波长调制光谱)技术,通 过调节激光器的驱动电流和工作温度实现对激光器 输出波长的控制。由于激光器的运行温度不易被精 准的动态控制,一般采用电流调控法,保持激光器的 工作温度不变,通过改变驱动电流的大小控制激光器 输出特定波长激光。

为确保中红外 DFB 激光器工作时的温度能够长 期维持稳定,本系统选用 ADI 公司生产的 LT8722 芯 片控制封装在激光器内部的 TEC(半导体制冷器)。 LT8722 是专用于驱动 TEC 的全桥 DC/DC 转换器,内 部集成了一个 25 位数模转换器(DAC)用于控制输出 电压,并且拥有两个额外的 9 位 DAC,可分别控制正 输出电流限制和负输出电流限制,正负输出电流最高 可达 4A。

主控芯片通过 SPI 接口灵活设置芯片内部 PWM 信号的占空比和频率,限制芯片的正负输出电压和正 负输出电流,并控制芯片使能。通过配置 SPIS_DAC 寄存器的数值来改变差分电压 V_{out} = V_{LDR} - V_{SFB} 大小, 动态调节 TEC 两端的电流的方向,实现激光器制冷或 制热效果。



图 3 TEC 驱动电路

3.3 温度采集电路

可调谐半导体激光器内部一般都集成了NTC(负 温度系数热敏电阻),其电阻值与温度变化成反比关 系。通过实时检测电阻值的变化情况,可推算出激光 器当前的运行温度。标称电阻较高的负温度系数热 敏电阻,可支持的最高温度也越高。正常 DFB 激光 器运行温度在 10 ℃~40 ℃之间,激光器生产厂家会 提供 NTC 的标称值(25 ℃时的标称电阻值)和相关计 算参数。

系统采用 ADI 公司生产的 AD7124-4 芯片作为 温度采集电路核心,如图 4 所示。芯片内部集成了一 个低噪声、低电流精密的 24 位 Sigma – Delta 型 ADC^[11],实际有效位数可达到 18 位左右;通过内部集 成的 PGA(可编程增益放大器)可实现 1 至 128 倍的 增益调节;同时具有嵌入式基准电压源、基准电压缓 冲器等。无论使用激励电流还是激励电压模式,都建 议使用比率式配置,其中基准电压和传感器电压是从 同一激励源获得。这就意味着激励源的任何变化都 不会影响测量的精度。

需要注意在参考温度为 25 ℃的条件下,检测电 阻 R_{SENSE} 的值必须等于 NTC 的标称电阻值,以便将输 出电压设置为基准电压的中间值。同时参考电阻的 初始容差和温度漂移参数必须很低,否则会影响系统 总体精度。



4 程序设计

数字 PID 控制具有增量式和位置式两种不同的 类型,由于激光器运行温度一个连续的物理量,需要 控制的是绝对温度值而非温度增量变化,所以采用位 置式 PID 控制算法^[12-13],其公式可以表示为: $u(n) = K_p e(n) + K_i \sum_{m=0}^{n} e(m) + K_d [e(n) - e(n-1)]$ 其中 e(n)为此次误差,e(n-1)为上次误差,e(m)为 累计误差, K_i 、 K_i 和 K_d 分别为比例、积分和微分系数。

为了能够获得激光器的实际温度,需要将 NTC 的电阻值和温度进行函数映射^[14].

$$R = R_{ref} e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)}$$

其中 R_{ref} 是 NTC 在 25 ℃时的标称电阻值, B 值是由 数据手册提供的计算参数, T 为实际温度, T_{ref} 为固定 的 25 ℃, 运算时 T 和 T_{ref} 需要换算为对应的开尔文温 度。

Zynq 温控程序设计结构如图 5 所示,系统通过 PS 端将设定的激光器目标温度转换为对应的 NTC 电 阻电压值,经过 PID 控制器计算出 TEC 驱动初始值, 驱动 LT8722 芯片输出一个初始的电流和电压。随后 通过 AD7124-4 芯片内部集成的 24 位 Sigma-Delta 型 ADC 读取到当前 NTC 两端实际的电压值;PS 端通 过当前电压值推算出激光器实际运行温度,PL 端以 初始目标温度转换后的电压值为参考,计算实际温度 控制量的误差,并根据设定好的 K_p 、 K_d 和 K_i 系数算 出下一次的 TEC 驱动电压值,以此达到对激光器运行 温度的高速控制。



使用主控芯片内部携带的多块 BRAM 搭建数据 缓存区,不但使 PS 端和 PL 端能够进行高速的数据交 互,同时提升了系统对大批量数据的计算存储能力, 如图 6 所示。



5 实验结果

在环境温度为 25 ℃的条件下,将激光器的目标

温度设置在 10 ℃~40 ℃的范围内,测试系统的实际 控温效果。通过 PS 端将计算好的温度参数存储在 SD 卡中,分别生成相应的 PID 控温曲线和温度误差 离散值。通过实验分别测试系统的升温功能和降温 功能,其中升温曲线为 25 ℃上升到 30 ℃,降温曲线 为 30 ℃下降到 25 ℃,PID 温控测试曲线如图7 所示。



图 8 为 30 ℃时激光器控温误差情况。通过上图 表明,激光器运行温度可以稳定控制在设定值,同时 实际控温稳定性可达到±0.01 ℃,满足 TDLAS 气体检 测系统要求。

6 结论

本文中针对碳中和领域中使用 TDLAS 技术检测 CO₂ 气体浓度的应用场景,基于 Zynq 芯片设计了一 种激光器温度控制系统。系统使用 XC7Z020 芯片作 为主控,驱动 AD7124-4 芯片采集 NTC 电压值,经过 主控内部 PL 端的 PID 温控计算后,驱动 LT8722 芯片 控制 TEC 工作,实现调节激光器温度的目的。经实验 测试表明,激光器控制温度设定在 10 ℃~40 ℃范围 内,控温效果可以达到±0.01 ℃。实验证明,本文设 计的基于 Zynq 芯片的激光器温度控制系统能够满足 TDLAS 气体检测系统要求。此外,该温控系统也可以 用于 TDLAS 检测其它气体的激光器温度控制系统 中。

参考文献

- [1] 田时雨.以系统观念推进碳达峰碳中和法治化[J].中共 中央党校(国家行政学院)学报,2023,27(03):69-78.
- [2] 项目综合报告编写组.《中国长期低碳发展战略与转型 路径研究》综合报告[J].中国人口·资源与环境,2020, 30(11):1-25.
- [3] 余建辉,肖若兰,马仁锋等.国际贸易"碳中和"研究热点领域及其动向[J].自然资源学报,2022,37(05):1303-1320.
- [4] 王彪,戴童欣,程林祥等.基于 VCSEL 激光器的甲烷和 二氧化碳检测系统设计[J].激光杂志,2022,43(07):15 -19.
- [5] Hou-quan L,Biao W,Yong-bo Y, et al. Carbon monoxide gas detection system based on VCSEL using TDLAS technology[P]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics (China), 2021.
- [6] 张继业,李雪,张建伟等.垂直腔面发射激光器研究进展 [J].发光学报,2020,41(12):1443-1459.
- [7] 田思聪,佟存柱,王立军等.长春光机所高速垂直腔面发 射激光器研究进展[J].中国光学(中英文),2022,15 (05):946-953.
- [8] 王彪, 俞泳波, 薛金波等. 基于 XC6SLX16 的 TDLAS 气体 检测激光驱动系统[J]. 激光杂志, 2022, 43(11):11-14.
- [9] Yuan P D, Fan Y T, Tao S L, et al. A CO Concentration Detection Platform and Temperature Compensation Method Based on Zynq Series SoC[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2395(1).
- [10] Adam M, Michal W. Fast Multithreaded Computations System Implemented in ZYNQ Architecture [J]. IFAC PapersOnLine, 2022, 55(4).
- [11] 邢震震,苏淑靖,梁文科等. 基于 FPGA 高精度 Δ-ΣADC 温度采集存储系统设计[J]. 电子测量技术,2022,45 (08):21-26.
- [12] 刘吉名,白小峰,何世安.基于位置式 PID 温控系统设计 [J].环境技术,2020,38(06):124-127+133.
- [13] Zhang J, Li H, Ma K, et al. Design of PID temperature control system based on STM32 [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 322(7):85-91.
- [14] 刘颖,黄嗣竣,刘义平等.NTC 热敏电阻温度标定方法研 究[J].中国测试,2022,48(S1):25-28.