

· 光电测量与检测 ·

## 用于乙炔气体检测的卡尔曼滤波式激光温控系统

王彪<sup>1</sup> 范兴龙<sup>1,3</sup> 戴童欣<sup>1,3</sup> 连厚泉<sup>1,3</sup> 黄硕<sup>1,2</sup> 李奥奇<sup>1,3</sup> 许玥<sup>1,3</sup>

(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:** 为了满足 TDLAS 乙炔气体检测系统对于激光器温度的需求,设计了一种用于乙炔气体检测的卡尔曼滤波式半导体激光器温控系统。系统通过温度采集模块实时采集激光器温度信息,并采用基于卡尔曼滤波器的积分分离式数字 PID 算法进行计算输出控制信号,经 TEC 驱动模块实现对激光器温度的精确控制。利用该系统对中心波长为 1 520 nm 激光器进行实际控温实验,结果表明:该温控系统的温度稳定时间小于 45 s,控温精度为  $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 。相较于常规的半导体激光器控温方式,所设计的温控系统能够在一定程度上抑制系统的温度超调量,增强系统的控温稳定性,同时也适用于其他气体的激光检测系统。

**关键词:** TDLAS;  $\text{C}_2\text{H}_2$ ; 温度控制; 卡尔曼滤波; 积分分离式 PID

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A DOI 编码: 10. 14016/j.cnki.jgzz. 2019. 06. 010

## Laser temperature control system for acetylene detection based on Kalman filter

WANG Biao<sup>1</sup>, FAN Xinglong<sup>1,3</sup>, DAI Tongxin<sup>1,3</sup>, LIAN Houquan<sup>1,3</sup>, HUANG Shuo<sup>1,2</sup>,  
LI Aoqi<sup>1,3</sup>, XU Yue<sup>1,3</sup>

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy 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 meet the requirement of TDLAS acetylene gas detection system for laser temperature, a kalman filter type semiconductor laser temperature control system for acetylene gas detection was designed. The system collects the laser temperature information in real time through the temperature acquisition module, and uses the PID algorithm with integral separate based on the Kalman filter to calculate the output control signal, and the precise control of laser temperature is realized by TEC driver module. The temperature control experiment of the laser with a center wavelength of 1 520 nm is carried out by the system. The results show that the temperature stability time of the temperature control system is less than 45 s and the temperature control accuracy is  $0.01^\circ\text{C}$ . Compared with the conventional semiconductor laser temperature control method, this paper The designed temperature control system can suppress the temperature overshoot of the system to a certain extent and enhance the temperature control safety of the system.

**Key words:** TDLAS;  $\text{C}_2\text{H}_2$ ; temperature control; Kalman filter; integral separate PID

## 1 引言

随着化工工业的迅速发展,乙炔( $\text{C}_2\text{H}_2$ )已经成为化工生产过程中的重要原料。但因其易燃易爆的特性,爆炸浓度范围为 2.5%~80%,严重威胁着工业生产的安全<sup>[1]</sup>。因此,在工业现场准确检测  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体浓度对保障生产安全至关重要。

可调谐激光吸收光谱技术(TDLAS)根据气体的选频特性,通过改变激光器中心工作波长,可有效扫

过待测气体吸收峰<sup>[2-6]</sup>。由 HITRAN 数据库得到乙炔气体的吸收谱线图,由于  $\text{C}_2\text{H}_2$  在 1 520 nm 处吸收较强,而且在该吸收线附近其他气体的干扰小<sup>[7-8]</sup>,因此,所设计温控系统以中心波长为 1 520 nm 的分布反馈式激光器(DFB)作为被控对象。

采用基于卡尔曼滤波器的积分分离式数字 PID 控制算法设计了一种用于乙炔气体检测的板级激光器温控系统,并且进行了实际温控测试验证,相较于常规的半导体激光器控温方式,所设计的温控系统具有温度超调量小,控制品质较好等特点,系统的控温稳定性得到一定的提升,同时也可以应用在其他气体的激光检测系统中。

收稿日期: 2019-02-21

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

## 2 系统结构设计

如图 1 所示为所设计的温度控制系统整体框图。主要包括: 主控模块、热电制冷器(TEC)驱动模块、温度采集模块、中心波长为 1 520 nm 的 DFB 激光器(内置 DFB 激光二极管、负温度系数热敏电阻、热电制冷器)等。

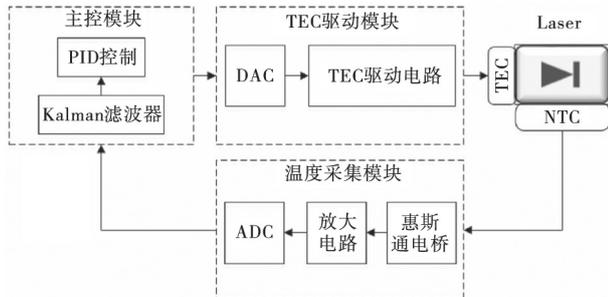


图 1 系统整体框图

系统中, 主控模块负责所设计温控系统的控制部分, 主要完成卡尔曼(Kalman)滤波算法以及积分分离式数字 PID 算法计算; TEC 驱动模块由数模转换器(DAC)以及 TEC 驱动电路组成, 主控输出控制信号通过 SPI 接口与 DAC 通信, DAC 将数字控制信号转换为模拟电压信号控制 TEC 驱动电路驱动 TEC 实现对 DFB 激光器的加热或者制冷; 温度采集模块由惠斯通电桥、差压放大电路、模数转换器(ADC)组成, 激光器温度变化将导致 NTC 阻值的变化, 从而引起惠斯通电桥输出差压的变化, 经放大电路由 ADC 采集之后送入主控模块处理。

## 3 硬件设计

### 3.1 主控模块

系统主控模块设计如图 2 所示。

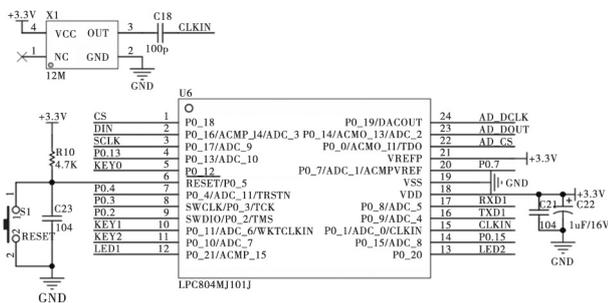


图 2 主控模块电路图

系统主控采用恩智浦公司生产的基于 Cortex M0 +内核的低功耗 32 位处理器芯片 LPC804, 芯片设有通过开关矩阵可配置功能的 I/O 端口, 可以用于灵活配置每一个 I/O 引脚的功能, 增强了系统的灵活性与可扩展性; 其采用 TSSOP 封装, 引脚数低, 尺寸小, 能够节省 PCB 空间便于系统的板极集成。系统中, 主控芯片通过 SPI 接口采集激光器温度信息, 完成卡尔

曼(Kalman)滤波算法以及积分分离式数字 PID 算法的实现工作, 同时将计算输出控制信号经 TEC 驱动模块的通信接口控制半导体制冷器两端的电流大小和方向, 实现对激光器温度的精确控制。

### 3.2 TEC 驱动模块

图 3 为所设计的 TEC 驱动模块。TEC 驱动电路主要由高效 PWM 功率驱动芯片 DRV593 构成。DRV593 是 TI 公司生产的功率驱动芯片, 最大能输出  $\pm 3A$  驱动电流, 具有可以选择的开关频率, 其 PWM 频率可以根据需要设置为 100 kHz 或者 500 kHz。同时 DRV593 具有内部过热以及过流保护功能: 当输出超过 4 A 时, 芯片会进入过流保护状态, 输出变为高阻态, 过流指示引脚做出相应动作, 过流指示灯亮; 当连接处温度超过 128 $^{\circ}C$  时进入过热状态, 芯片过热指示引脚做出相应动作, 过热指示灯亮, 超过 158 $^{\circ}C$  芯片会自动关闭, 但并不会进入锁死状态, 在温度恢复至 128 $^{\circ}C$  以下时会再次进入正常工作状态。

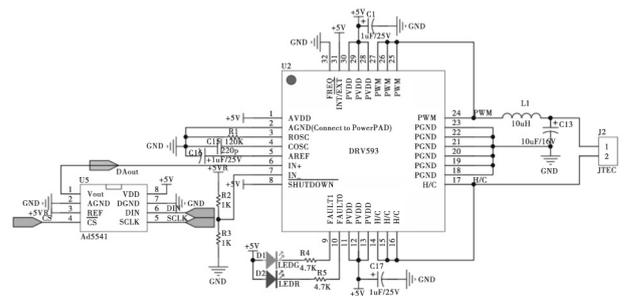


图 3 TEC 驱动模块电路图

DRV593 芯片输出受输入电压信号控制, 选择 ADI 公司的数模转换芯片 AD5541, 其具有 16 位的分辨率, 且具有建立时间短、响应速度快等优点, 能够满足系统对于精度要求。主控芯片通过输出数字控制信号, 由 DAC 芯片转换为模拟电压信号控制 DRV593 芯片输出控制 TEC 两端电流的方向与大小。

### 3.3 温度采集模块

如图所示为系统温度采集模块电路图

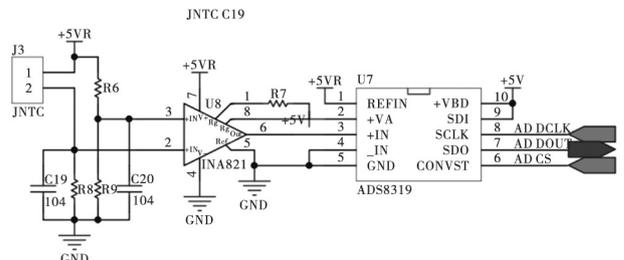


图 4 温度采集模块电路图

负温度系数热敏电阻(NTC)集成在激光器内部, 在温度为 25 $^{\circ}C$  时, 其标称值为 10 k $\Omega$ , 其阻值随着温度的升高而降低。

惠斯通电桥由固定阻值的电阻 R6、R7、R8 以及 NTC 构成, 其输出电压公式为:

$$V_{out} = \frac{R_{NTC}}{R_8 + R_{NTC}} V_{in} - \frac{R_9}{(R_6 + R_9)} V_{in} \quad (1)$$

其中  $V_{in} = +5 \text{ V}$ 。

采用电桥进行热敏电阻阻值变化的测量,能够抑制电源的共模噪声干扰。其输出差模电压经放大器放大后送入 AD 进行模数转换。放大器采用 TI 公司的低功耗精密仪表放大器芯片 INA821,其可实现低功耗、低噪声并且可在较宽的单电源或双电源电压范围内运行,可以通过单个外部电阻在 1 到 10 000 范围内设置任意增益,最大失调电压为  $35 \mu\text{V}$ ,可以实现对电桥输出电压的放大保证系统精度,同时具有高共模抑制比以及低温漂系数。主控模块通过模数转换芯片将放大器输出模拟电压转换为与激光器温度有关的数字量,为保证系统对温度的采集精度要求,选用 TI 公司的 16 位逐次逼近式 AD 转换芯片 ADS8319,其具有 500 kHz 的采样速率以及较低的功耗,在满足系统所要求精度的同时能够降低系统的整体功耗。

## 4 软件设计与仿真

系统软件控制算法采用基于卡尔曼滤波器的积分分离式 PID 算法实现。温度采集模块的采集数据信息含有一定的噪声,经过卡尔曼滤波处理之后能够减小外界干扰对系统采集精度的影响<sup>[9]</sup>。之后将经过滤波处理后的数据送入 PID 算法部分进行处理,所设计系统的温度控制品质会得到一定的改善;同时采用积分分离式 PID 抑制系统的温度超调量,在一定程度上保证系统稳定运行。

### 4.1 卡尔曼滤波器

卡尔曼滤波的目的是最小化估计的均方差,降低系统的输出信号所受噪声的干扰。在滤波处理中,通过递推算法不断校正估计值,最终使得误差均方差最小<sup>[10-11]</sup>。

一个离散系统的系统方程一般形式为:

$$x_k = \varphi_{k,k-1} x_{k-1} + (B_{k-1} u_{k-1}) + \Gamma_{k-1} w_{k-1} \quad (2)$$

测量方程为:

$$Z(k) = C_k x(k) + v(k) \quad (3)$$

状态一步预测:

$$\hat{x}_{k/k-1} = \varphi_{k,k-1} * x_{k-1} \quad (4)$$

均方误差一步预测:

$$\hat{P}_{k/k-1} = \varphi_{k,k-1} * P_{k-1} * \varphi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \quad (5)$$

滤波增益:

$$H_k = \hat{P}_{k/k-1} * C_k^T [C_k * \hat{P}_{k/k-1} * C_k^T + R_k]^{-1} \quad (6)$$

滤波估计:

$$x_k = \hat{x}_{k/k-1} + H_k [Z_k - C_k * \hat{x}_{k/k-1}] \quad (7)$$

K 时刻最优均方误差:

$$P_k = [I - H_k * C_k] * \hat{P}_{k/k-1} \quad (8)$$

公式(4)~(8)为离散型卡尔曼滤波基本方程。

通过给定起始值,根据量测矩阵就可以得到状态估计值<sup>[12-13]</sup>。

为验证采用卡尔曼滤波能够有效抑制系统噪声,采用 MATLAB 进行仿真验证,在信号上叠加高斯噪声,如图 5 所示为卡尔曼滤波前后数据仿真对比结果,说明使用卡尔曼滤波可以实现对含有噪声信号的滤波处理。

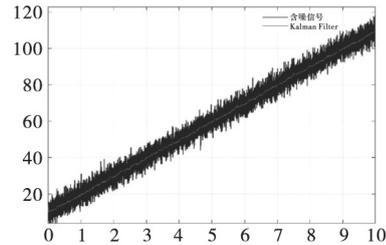


图 5 卡尔曼滤波处理仿真

### 4.2 积分分离式 PID 算法

常规的 PID 控制算法在系统的启动、增减设定值以及控制过程结束时,会造成 PID 运算的积分累积,此时常规 PID 算法的计算输出量会出现较大的偏差,引起被控系统的超调或者振荡。积分分离的控制原理是:当输入偏差(即反馈量与设定值)较大时,关闭积分项,避免系统超调量过大而造成系统的稳定性降低;因此,设置一个合理的积分分离线,当输入偏差接近该值时,引入积分控制调整,消除系统的静态误差,提高 PID 的控制精度<sup>[14-18]</sup>。

控制算法可以表示如下:

$$U(t) = K_p e(t) + \beta K_i \sum_{j=0}^k \text{err}(j) + K_d (e(t) - e(t-1)) \quad (9)$$

其中  $\mu(t)$  为输出量  $e(t)$  为  $t$  时刻偏差量  $K_p$  为比例系数  $K_i$  为积分系数  $K_d$  为微分系数。

$\beta$  称为积分开关系数,其取值范围为:

$$\beta = \begin{cases} 1 & |\text{err}(k)| \leq \varepsilon \\ 0 & |\text{err}(k)| > \varepsilon \end{cases} \quad (10)$$

为验证积分分离式 PID 控制效果,使用 MATLAB 软件进行仿真验证,对比分析积分分离式 PID 与常规 PID 对于阶跃信号的控制效果。仿真结果表明,采用积分分离式 PID 相较于常规 PID 算法能够抑制系统的超调量,保证系统的稳定运行。

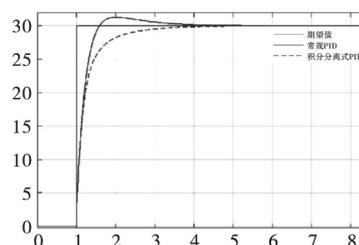


图 6 PID 控制曲线仿真

## 5 实验结果与分析

### 5.1 TEC 驱动模块实物

所设计的 TEC 驱动模块实物图如图 6 所示。

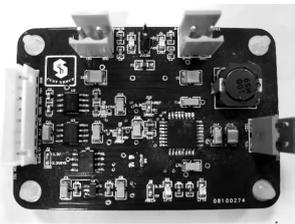


图 7 TEC 驱动模块实物图

系统中,主控模块通过 SPI 接口与所设计 TEC 驱动模块通信实现对 DFB 激光器温度的控制,同时通过温度采集模块实时采集 DFB 激光器的温度信息。

### 5.2 实际控温测试

系统所使用的 1 520 nm DFB 激光器理想工作温度为 25 °C 因此实验中将激光器的目标温度设定为 25 °C 室温为 23 °C 进行控温实验。在零时刻启动温控系统 温度测试曲线对比如图 8 所示。

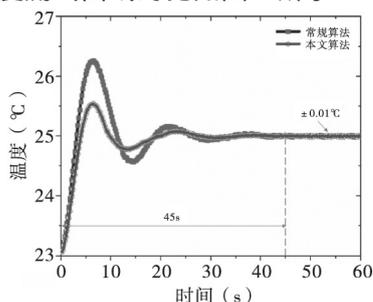


图 8 温度测试曲线对比

由图可知,所设计温控系统能够使激光器达到设定温度,采用基于卡尔曼滤波的积分分离式 PID 算法之后,能够在一定程度上抑制系统的温度超调量,增强系统的稳定性,从控温开始至系统最终稳定所需时间约为 45 s,控温精度为 $\pm 0.01$  °C。

## 6 结论

基于 TDLAS 气体检测原理,本文设计了一种用于  $C_2H_2$  气体检测的卡尔曼滤波式半导体激光器温度控制系统。系统采用基于卡尔曼滤波器的积分分离式数字 PID 控制算法进行温度调节,主控芯片通过温度采集模块实时采集激光器温度,温度数据经卡尔曼滤波处理之后送入积分分离式 PID 计算,输出控制信号控制 TEC 驱动模块调节激光器温度,最终实现对激光器的温度控制。经过实际控温实验验证,所设计系统的温度稳定时间小于 45 s,控温精度为 $\pm 0.01$  °C。通过软件仿真与实验结果表明,相较于常规的激光器控温方式,所设计的用于乙炔气体检测的激光温控系统

能够在一定程度上抑制系统超调,增强系统的控温稳定性,同时也适用于其他气体的激光检测系统。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 李峥辉,姚顺春,卢伟业,朱晓睿,邹丽昌,李越胜,卢志民.TDLAS 测量  $CO_2$  的温度影响修正方法研究[J].光谱学与光谱分析,2018,38(07):2048-2053.
- [3] 许超,王辽,钟晨光,等.吸收光谱法冲压发动机隔离段来流质量的流量测量[J].光学精密工程,2018,26(08):1888-1895.
- [4] 张龙,陈建生,高静,等.大功率半导体激光器驱动电源及温控系统设计[J].红外与激光工程,2018,47(10):102-108.
- [5] 王宗清,段军,曾晓雁.大功率半导体激光器高精度温控系统研究[J].激光技术,2015,39(3):353-356.
- [6] 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.
- [7] 许宏,王锴.一种利用 HITRAN 数据计算气体辐射特性的方法[J].光电技术应用,2018,33(02):28-31.
- [8] 张建新,韩变华,杨庆新,等.热电制冷 LED 自然对流散热的设计与优化[J].发光学报,2018,39(4):523-533.
- [9] 张敏,李凯,韩焱,等.基于卡尔曼滤波的陀螺仪降噪处理[J].传感技术学报,2018,31(2).
- [10] 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(8):1837-1845.
- [11] 邓娜娜,董斌,黄宇青,等.基于卡尔曼滤波的振动信号采集与处理系统设计[J].计算机应用与软件,2018,35(3):98-101.
- [12] 奚静思,刘品宽,丁汉.自适应线性自抗扰控制器的设计[J].光学精密工程,2018,26(07):1749-1757.
- [13] 徐德前,庄仕伟,马雪,等.生长温度对 MOCVD 外延  $ZnO$  纳米结构的影响[J].发光学报,2018,39(10):1425-1430.
- [14] 程鑫,刘奔,余俊峰,等.改进型积分分离 PID 的 3D 打印机喷头温度控制系统[J].数字技术与应用,2018,36(08):11-14.
- [15] 陈家金,王贵师,刘锴,等.免标定波长调制吸收光谱技术用于乙炔探测的研究[J].光学学报,2018,38(09):370-375.
- [16] 陈焕庭,陈福昌,何洋,等.多芯片 LED 器件热学特性分析[J].发光学报,2018,39(5):751-756.
- [17] 王冠龙,崔靛,朱学军.基于数字 PID 算法的温度控制系统设计[J].传感器与微系统,2019,38(01):92-94+102.
- [18] 党敬民,于海业,宋芳,等.应用于早期火灾探测的 CO 传感器[J].光学精密工程,2018,26(8):1876-1881.