

论域可变的模糊 PID 控制在半导体激光器温度控制系统中的应用

张安迪¹, 张艳荣¹, 李涛^{2*}

¹西南交通大学机械工程学院, 四川 成都 610031;

²中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 半导体激光器输出的精准性和稳定性受温度的影响较大, 温度的变化会导致半导体激光器阈值电流、电光转换效率和波长大小变化, 进而影响输出功率。为了实现半导体激光器在设定温度条件下正常工作, 设计了单片机为核心控制元件, 热电制冷器(TEC)和 PTC 加热器为执行元件, AD590 温度传感器和铂电阻 PT1000 为温度检测元件的温度控制系统, 通过论域可变的模糊比例-积分-微分(PID)控制算法输出不同占空比的脉冲宽度调制波对温度进行控制。通过仿真分析, 此控制算法不仅可以减小系统超调量, 也具有很强的鲁棒性。最后实验结果表明, 在 $-12\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的控温范围内, 可以达到系统所要求 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的控温精度, 并在 250 s 内达到预设温度。

关键词 激光光学; 半导体激光器; 单片机; 论域可变; 温度控制

中图分类号 TN242; TP273

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1214003

Application of Variable Domain Fuzzy PID Control in Semiconductor Laser Temperature Control System

Zhang Andi¹, Zhang Yanrong¹, Li Tao^{2*}

¹ School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

² Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The accuracy and stability of semiconductor laser's output are greatly affected by temperature, temperature change will lead to the change of threshold current, electro-optic conversion efficiency and wavelength, and then affect the output power of semiconductor laser. As such, we designed a temperature control system for the normal operation of the semiconductor lasers at set temperature. This system uses a single chip microcomputer as the core control element, a thermoelectric cooler and a PTC heater as the executive elements, an AD590 temperature sensor and a PT1000 platinum resistor as the temperature detection elements. It controls the temperature by outputting pulse width modulation waves with different duty cycles through the variable-domain fuzzy proportional-integral-derivative (PID) control algorithm. Through simulation analysis, this control algorithm can not only reduce the system overshoot, but also possesses strong robustness. Experimental results indicate that the system can achieve the required temperature control precision of $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the range of $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ and reach the target temperature within 250 s.

Key words laser optics; semiconductor laser; single chip microcomputer; variable domain; temperature control

OCIS codes 140.3320; 140.3430

1 引言

半导体激光器又称激光二极管, 具有体积小、轻

量化、电光转换效率高、结构紧凑的优点^[1], 特别是近几年科研人员对半导体激光器外延生长、热管理、光学整形等关键技术的研究及制造工艺的重大改

收稿日期: 2020-12-04; 修回日期: 2021-01-19; 录用日期: 2021-01-28

* E-mail: 491932645@qq.com

进,使得二极管激光器的功率、效率、光束质量大大提高^[2]。因此,半导体激光器越来越广泛地应用于工业生产、医疗卫生、国防安全等领域^[3-5]。在实际应用中,半导体激光器是一种较为敏感的器件。其输出的精准性和稳定性主要受温度和电流这两个物理量的影响^[6]。电流的变化会引起半导体激光器输出波长的变化,导致半导体激光器的工作状态发生改变^[7]。同时,半导体激光器作为电光转换器件,在工作时不可避免地会将一部分电能转换为热能,引起温度升高^[8]。升温会导致半导体激光器阈值电流增大,中心波长漂移^[9]。另一方面,温度过低也会影响半导体激光器输出功率的大小。为了保证半导体激光器在实际工作中的稳定性,必须对工作温度进行精确控制,并提供稳定的电流^[10]。因此,对半导体激光器温度控制器的研制是十分必要的。

目前,针对半导体激光器温控问题,国内外进行了大量的研究。王宗清等^[11]利用分段比例-积分-微分(PID)控制算法,控温精度达到 $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$,但控温范围仅为 $15\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。卢燕等^[12]采用数字信号处理(DSP)芯片的方式实现了 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 控温精度的温控系统,但控温方式只能加热不能制冷。梁嘉琪等^[13]

设计的电路虽然可在大量程内实现测温精度 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,但其电路结构复杂,也不适用于量程内对更小温度变化检测的需求。郑本昌^[14]提出了一种基于PID自动控制原理的高精度温控电路设计与实现方法,采用齐格勒-尼柯尔斯整定规则PID电路参数进行设定,温控精度小于 $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$,但控温范围也只能达到 $0\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

针对上述问题,本文提出一种论域可变的模糊PID算法用于半导体激光器温度控制,并结合订制的高精度铂电阻PT1000提高了温度控制的准确性和精度。通过仿真验证了算法的可行性。理论分析可知,该系统的控温精度可达 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,控温范围在 $-12\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。

2 基本原理

2.1 系统总体设计

整个半导体激光器温控系统由主控制器STM32F405芯片、温度检测模块、制冷和加热模块、散热模块、模数(A/D)转换模块、通信模块、电源模块、上位机模块等构成。图1为温控系统结构示意图。

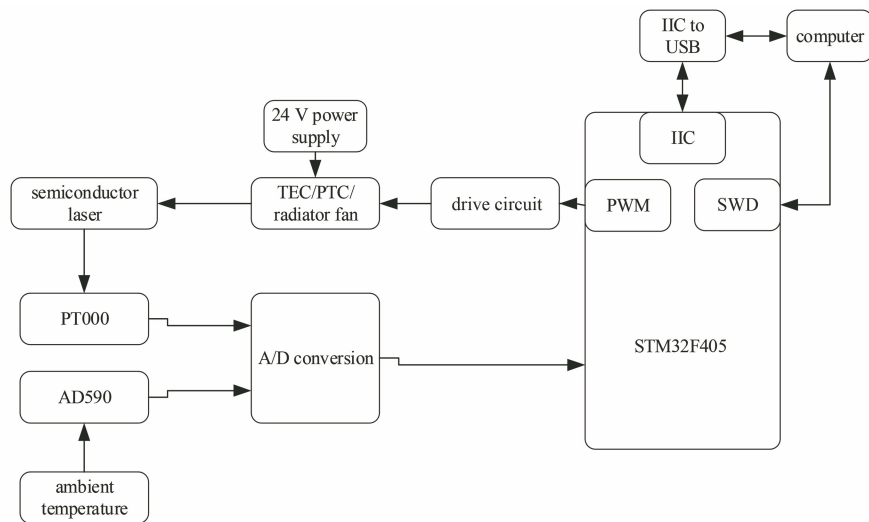


图1 温控系统结构

Fig. 1 Structure of temperature control system

该系统工作原理为:铂电阻PT1000和温度传感器AD590分别将测得的激光器温度和环境温度转换为电压值,通过A/D转换模块送入主控制器STM32F405芯片,通过输出脉冲宽度调制(PWM)波的方式驱动功率开关的导通,实现热电制冷器(TEC)或者PTC的工作。根据实际温度和设定温度的偏差,改变PWM波的占空比。TEC和PTC分别为激光器制冷和加热。当激光器温度低于设定

温度时,PTC开始工作;当激光器温度超过设定温度时,TEC开始工作同时风扇转动,以散去TEC热面的热量。本系统采用论域可变的模糊PID控制算法确定PWM信号的占空比,能够实现一定范围内温度的精确控制。

2.2 温度测量方案

本控制系统采用AA级订制的高精度铂电阻PT1000对半导体激光器进行温度检测,测温范围

为 $-200 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$ 。采用 AD590 温度传感器进行环境温度检测,具有准确度高、动态电阻大、响应速度快、测量范围大等特点^[15-16]。AD590 的输出电流与温度呈线性关系,温度升高 $1 \text{ }^\circ\text{C}$,电流增加 $1 \text{ } \mu\text{A}$,温度为 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,输出电流为 $273.2 \text{ } \mu\text{A}$ 。

根据国际电工委员会 IEC751 的标准,铂电阻 PT1000 的阻值满足如下条件。

当 $-200 \text{ }^\circ\text{C} < T < 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时

$$R_{PT1000} = R_0 [1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3] \quad (1)$$

当 $0 \text{ }^\circ\text{C} < T < 600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时

$$R_{PT1000} = R_0 (1 + AT + BT^2), \quad (2)$$

式中: $A = 3.908 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; $B = 5.775 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; $C = -4.183 \times 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。

在高精度测温电路中,为了减小导线电阻对测温结果的影响,PT1000 采用三线制接法,如图 2 所示。铂电阻和阻值已知的精密电阻串联或并联组成电桥,并用恒压源 U_i 激励,测得 U_A 和 U_B 的差 U_s ,结合 R_1 、 R_2 和 R_3 的值间接求出铂电阻 R_x 的阻值。

$$U_s \approx U_i \left(\frac{R_x + R_{w3}}{R_1 + R_{w1} + R_{w2} + R_x} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right), \quad (3)$$

式中: R_{w1} 、 R_{w2} 、 R_{w3} 为导线电阻。当电桥平衡时,导线间阻值的影响将被消除。

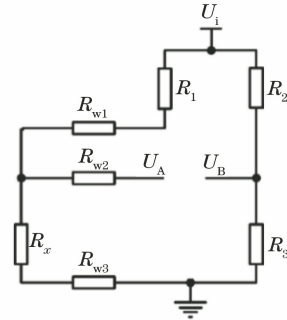


图 2 PT1000 三线制接法

Fig. 2 PT1000 three wire connection method

由于流经 PT1000 的电流值不能超过 0.3 mA ^[17],当激励电压设置为 3 V 时,桥臂电阻 R_1 和 R_2 为 $10 \text{ k}\Omega$,稳压电源芯片选择 REF3030,则三线制铂电阻电桥测量电路设计如图 3 所示。

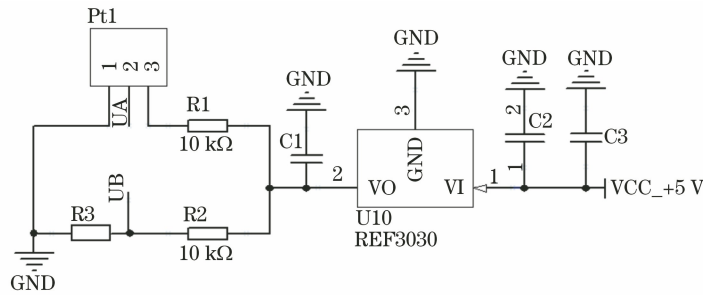


图 3 三线制 PT1000 温度测量模块

Fig. 3 Three-wire PT1000 temperature measurement module

经计算, U_A 和 U_B 的差值较小,需经过放大。故采用 AD623 差动放大器对电压进行放大。放大电路如图 4 所示,放大后的电压最大为 5 V 。根据 AD623 的数据手册,电压的放大关系为

$$U_p = (U_A - U_B) \frac{100 + R_g}{R_g}, \quad (4)$$

式中: R_g 为增益电阻; U_p 为放大后的电压。

由图 3 电桥电路中 R_3 的阻值和 AD623 的放大增益 G ,以及 PT1000 的阻值与温度的关系,可以求得此时的温度值。设 A/D 转换模块输入的最大电压模拟量为 U ,电桥电路的输入电压为 U_i ,则 AD623 的输出电压即 U_A 和 U_B 电压差为

$$U_A - U_B = U_i \left(\frac{R_x + r}{R_1 + R_x + 2r} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) = \frac{U}{G}. \quad (5)$$

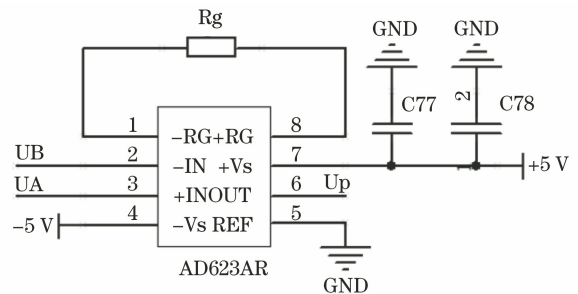


图 4 电压放大电路

Fig. 4 Voltage amplifier circuit

求得 PT1000 内阻 R_x 的值进而可求出相对应的温度值。A/D 转换模块的输入电压为 $0 \sim 5 \text{ V}$,故 $U = 5 \text{ V}$,已知 $U_i = 3 \text{ V}$, $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 953 \text{ } \Omega$, $G = 40$ 可得 PT1000 的最大阻值约为 $1476.77 \text{ } \Omega$,对应的温度值约为 $120 \text{ }^\circ\text{C}$,而 PT1000

在 $953\ \Omega$ 时对应的温度约为 $-12\ ^\circ\text{C}$ 。因此,此温度控制系统的测温量程为 $-12\sim 120\ ^\circ\text{C}$ 。从(5)式可以看出,测温量程与可变电阻 R_3 和 AD623 的增益 G 有关,在后续的设计中,若要改变测温的量程,只需改变 R_3 和 G 这两个参数即可。

A/D 转换模块采用 AD7682^[18] 芯片,它是一款

高速、低功耗、双核 16 位模数转换器,并具有模拟输入过压保护功能。温度测量与采集模块如图 5 所示,温度传感器 AD590 将测得的温度值转换为电流值,通过高精度电阻 R_4 再转换为电压信号,经过电压跟随器后同上述放大电压 U_p 一起送入 A/D 转换模块的 1 通道和 2 通道,经转换后送入单片机。

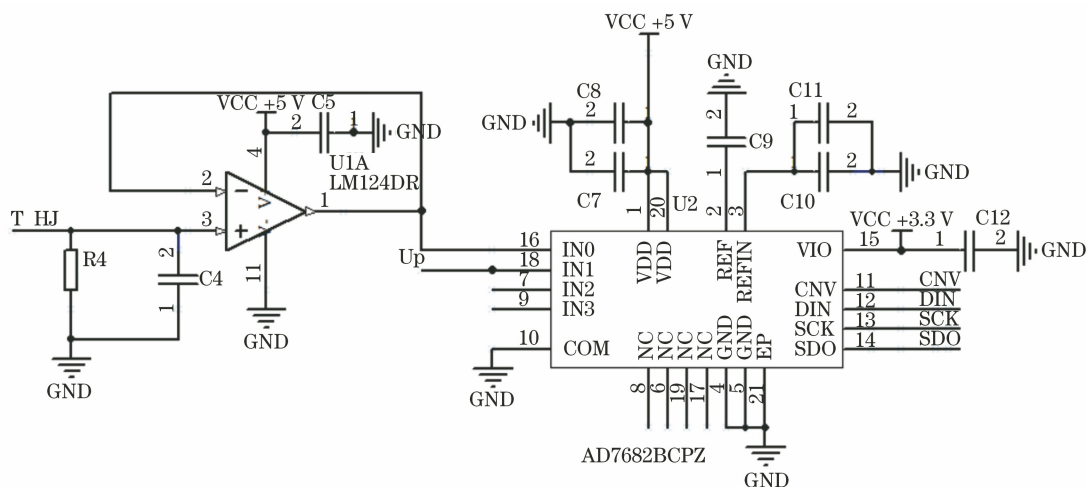


图 5 温度测量与采集模块

Fig. 5 Temperature measurement and acquisition module

2.3 温度控制电路

本系统温度控制的执行元件是 TEC 和 PTC,功率开关采用 MOSFET 晶体管,单片机输出占空比不同的 PWM 波控制开关的导通。

如图 6 所示,温度控制电路为 BUCK 电路,单片机输出的 PWM 波经过栅极驱动器与功率开关的栅极(Q1G)相连,当输出的 PWM 波为高电平时,功

率开关导通。功率开关的漏极通过 Q2 或者 Q3 与 TEC 或者 PTC 相连。当设定温度高于激光器温度时,Q2 导通,TEC 工作;当设定温度低于激光器温度时,Q3 导通,PTC 工作。

图 7 为风扇控制电路,和图 6 的原理相同,当 TEC 工作时,风扇转动给 TEC 热面散热。

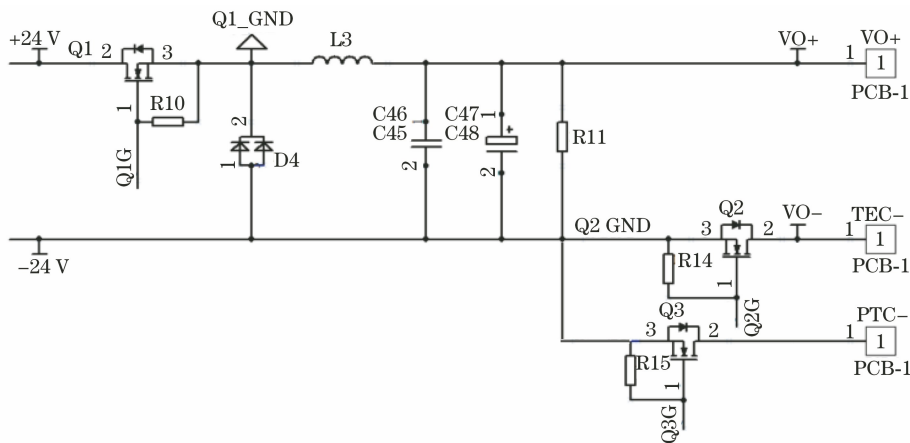


图 6 TEC 和 PTC 控制电路

Fig. 6 TEC and PTC control circuit

3 系统算法与仿真

3.1 模糊自整定 PID 控制

模糊自整定 PID 控制器以系统误差 e 及其变

化率 ec 为输入,利用模糊控制规则对 PID 的 3 个参数进行在线修改,以适应变化的 e 和 ec 对 PID 参数自整定的要求。PID 控制的参数 K_p 、 K_i 、 K_d 自整定规律如下^[19]。

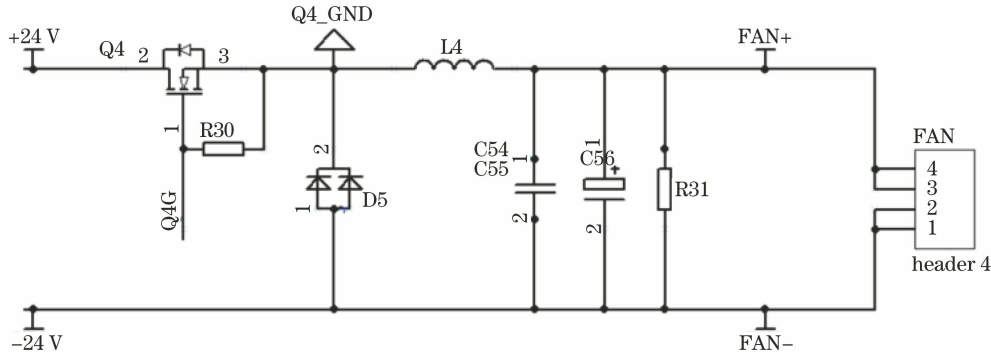


图 7 风扇控制电路

Fig. 7 Extractor fan control circuit

1) 当误差 $|e|$ 过大时, 为了提高系统的响应速度, K_p 的值应设置大一些; 为了防止 e 瞬间增大造成微小过饱和现象, 将 K_d 的值设置小一些; 同时设置 $K_i = 0$ 。

2) 当误差 $|e|$ 和 $|ec|$ 适中时, 为了提高系统响应速度并减小超调量, 要取较小的 K_p 值, 适中的 K_i 、 K_d 值。

3) 当 $|e|$ 较小时, 为保证系统的稳定性, 应增大 K_p 和 K_i 的值, 同时为避免系统产生振荡, 应适当地选取 K_d 的值。PID 参数的修正值为

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 为 3 个参数的初始值; ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为 e 和 ec 经模糊化和模糊推理后的增量。

3.2 论域可变的模糊 PID 控制

模糊 PID 控制器的量化因子、比例因子和论域范围是不可变的, 具有一定的局限性。当论域的选择范围较小或者较大时, 都会影响控制效果。针对上述问题提出了论域可变的思想, 在模糊 PID 控制基础上添加合适的伸缩因子, 基本论域的范围就会随着误差变化而实时改变^[20]。其结构如图 8 所示。

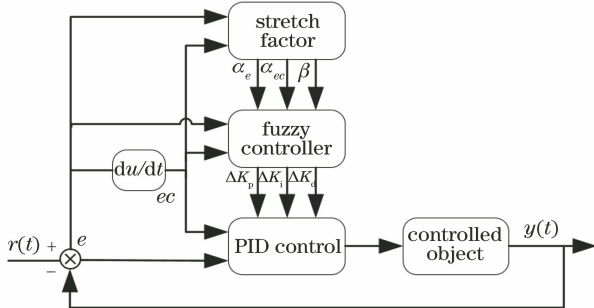


图 8 论域可变的模糊 PID 控制结构

Fig. 8 Variable domain fuzzy PID control structure

设 e 和 ec 的初始论域都为 $[-E, E]$, $\alpha_1(x)$ 和 $\alpha_2(x)$ 为 e 和 ec 的伸缩因子, 则 e 的论域范围变为 $[-\alpha_1(x)E, \alpha_1(x)E]$, ec 的论域范围变为 $[-\alpha_2(x)E, \alpha_2(x)E]$ 。同理设输出变量 Y 的论域为 $[-U, U]$, 伸缩因子为 $\beta_i (i = 1, 2, 3)$, 则 Y 的论域变化范围为 $[-\beta_i U, \beta_i U]$ 。基于函数设计的伸缩因子设计如下^[21]

$$\begin{cases} \alpha_1(x) = 1 - \lambda_1 \exp(-k_1 x^2), \\ \alpha_2(x) = 1 - \lambda_2 \exp(-k_2 x^2), \\ \beta_1 = c_1 |e|, \beta_2 = \frac{1}{c_2 + |e|}, \beta_3 = c_3 |e| \end{cases} \quad (7)$$

3.3 温控系统的数学模型

温控系统的数学模型如图 9 所示。其中 $R(S)$ 表示目标温度, $G_c(S)$ 和 $G_D(S)$ 表示控制器和被控对象的传递函数, $Y(S)$ 表示实际温度, $H(S)$ 为系统反馈部件。

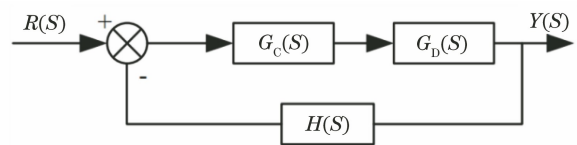


图 9 温控系统数学模型

Fig. 9 Mathematical model of temperature control system

设半导体激光器内部在某一时刻 t 的热量为 Q_t , 则有

$$Q_t = Q_1 + Q_2, \quad (8)$$

式中: Q_1 为激光器自热效应产生的能量; Q_2 为激光器与外界热交换产生的能量^[22]。二者的表达式为

$$Q_1 = C \frac{dT_l}{dt}, \quad (9)$$

$$Q_2 = C \frac{T_l - T_1}{R}, \quad (10)$$

式中: C 为半导体激光器内部热容量; T_l 为当前时刻半导体激光器温度; T_1 为当前时刻环境温度; R 为半导体激光器内部阻值。

当环境温度远小于半导体激光器温度时, T_1 可以忽略不计,(8)式简化为

$$Q_l = C \frac{dT_l}{dt} + \frac{T_l}{R} \quad (11)$$

再经过拉普拉斯变换得到系统的传递函数,表示为

$$\frac{T_l(s)}{Q_l(s)} = \frac{1}{CS + \frac{1}{R}} \quad (12)$$

由于系统输出 $U(S)$ 正比于 $Q_l(s)$, 即 $U(S) = kQ_l(s)$, 可得

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K \exp(-\tau s)}{TS + 1}, \quad (13)$$

式中: K 为增益环节, $K = kR$; T 为时间常数, $T = RC$; τ 为时滞环节; S 为复频域。

3.4 系统仿真

根据实际电路图与相关测量数据,取 $K = 1.5$, $T = 110$, $\tau = 0.1$ 。代入(13)式得到系统模型为一阶滞后环节。

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1.5 \exp(-0.1s)}{110S + 1} \quad (14)$$

并设置(7)式中的参数 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.75$, $k_1 = k_2 = 0.5$, $c_1 = 3$, $c_2 = 0.5$, $c_3 = 2.5$ 。在 MATLAB 的 SIMULINK 环境中搭建系统控制算法的仿真模型^[23], 如图 10 所示。

当给定值为 1 时,论域可变的模糊 PID 控制器、模糊 PID 控制器和常规 PID 控制器的响应曲线对比图如图 11 所示。

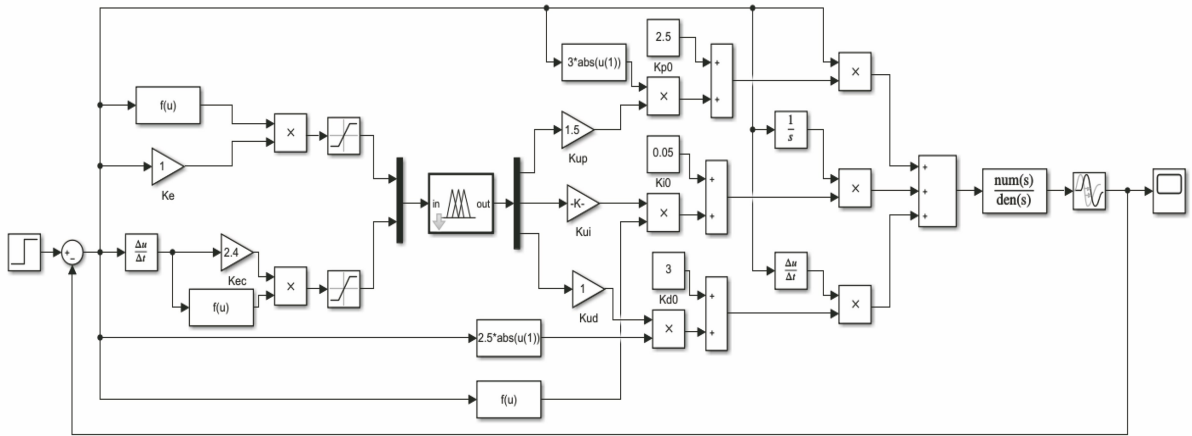


图 10 论域可变的模糊 PID 控制仿真模型

Fig. 10 Simulation model of variable domain fuzzy PID control

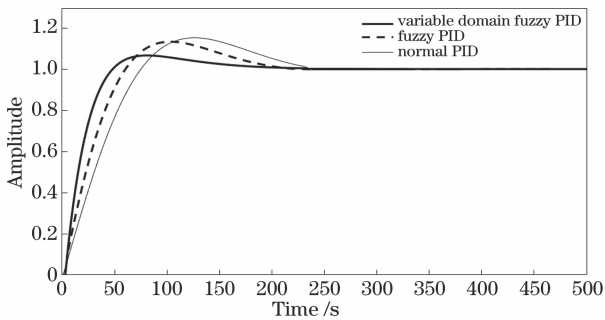


图 11 三种控制器的响应曲线对比图

Fig. 11 Comparison of response curves of three controllers

由图 11 可以看出,三种控制方式都达到设定值,经过一段时间后的稳态误差均能减小到 0。但是论域可变的模糊 PID 控制相比于常规 PID 和模糊 PID 控制,响应速度更快,在 200 s 内就能达到稳态,超调量更小,仅为 5%,稳定性更高。

4 分析与讨论

为了验证所设计系统的可行性,搭建如图 12 所示的系统测试平台示意图。设置系统外部电源为 +24 V,最大输出电流为 6 A,连接到控制板的输入端,根据电路原理图测量电源通路中各电源模块转换后的电压以及各芯片的电源电压,如 VRB2412S-6WR3 的输出电压、单片机的 3.3 V 供电电压等,保证各电压的正确,防止烧坏控制板。上位机操作及显示界面采用 QT 编写,通过 IIC 转 USB 设备将数据上传至上位机,并将测试结果显示在界面中。

本系统是通过输出 PWM 波来控制温度的,因此 PWM 输出的正确与否对本系统至关重要,在整体测试前也应对 PWM 输出进行验证。图 13 显示了设置 PWM 占空比为 50% 时的波形,可以看出,

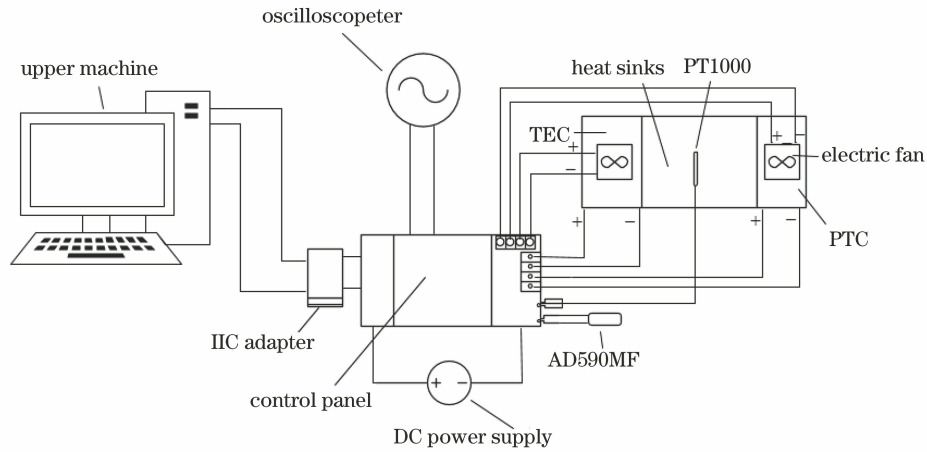


图 12 系统测试平台

Fig. 12 System test platform

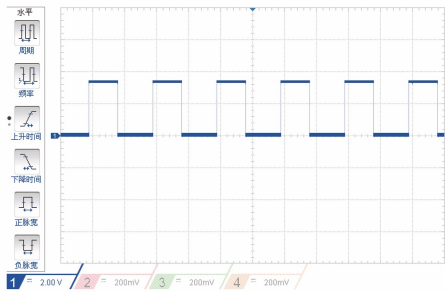


图 13 设置 PWM 占空比为 50% 时的测试结果

Fig. 13 Test result when PWM duty cycle is set to 50%

测试 PWM 波输出的结果正确。

为了验证温度传感器测温的准确性，使用 PT1000、AD590 和高精度温度测量仪共同测量某时刻散热片温度。用示波器测量进入 A/D 芯片 2 通道的电压如图 14 所示，测量电压为 1.112 V，通过公式计算可得 PT1000 的电阻约为 1064.396 Ω ，对应的温度约为 16.53 $^{\circ}\text{C}$ 。同理测量 A/D 芯片 1 通道的电压为 1.449 V，经计算对应温度为 16.5 $^{\circ}\text{C}$ 。温度测量仪显示的温度为 16.52 $^{\circ}\text{C}$ ，说明 PT1000 和 AD590 测温是准确的。

测试常规 PID、模糊 PID 和论域可变的模糊

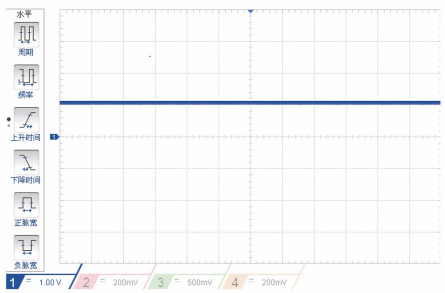


图 14 A/D 转换模块电压

Fig. 14 Voltage of A/D conversion module

PID 控制算法对系统的控制效果，将不同算法下系统的温度数据分别记录下来并在 MATLAB 中画出温度的曲线变化图如图 15 和图 16 所示。

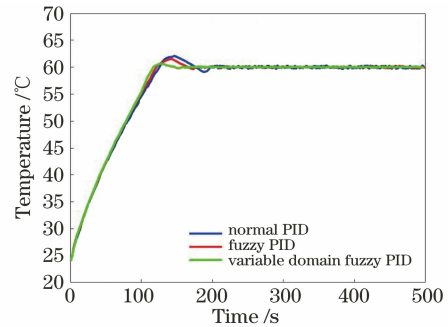


图 15 目标温度为 60 $^{\circ}\text{C}$ 时的测试结果

Fig. 15 Test result at target temperature of 60 $^{\circ}\text{C}$

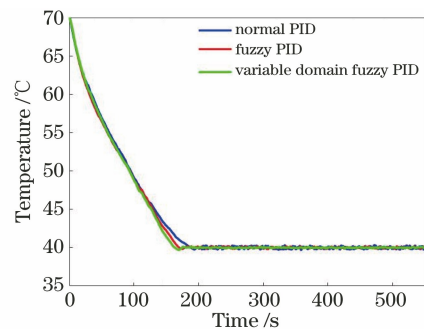


图 16 目标温度为 40 $^{\circ}\text{C}$ 时的测试结果

Fig. 16 Test result at target temperature of 40 $^{\circ}\text{C}$

图 15 中，系统的初始温度都为 24 $^{\circ}\text{C}$ ，目标温度都为 60 $^{\circ}\text{C}$ ，可以看出三种控制算法都可以对系统进行稳定控制。PID 控制的超调量比较大，达到稳态的时间比较长，模糊 PID 控制效果略好，而论域可变的模糊 PID 控制效果最佳，系统能在 170 s 左右就达到稳定，超调量最小约为 1.2%，并且在达到设定温度后的稳定性也最好。

图 16 中,系统初始温度为 70 °C,设置温度为 40 °C。从图中看到三种控制算法的测试结果对比差别不是很大,但相比于模糊 PID 和常规 PID,论域可变的模糊 PID 控制能让系统更快达到设定温度并保持稳定,达到稳定的时间约为 188 s。在测试系

统降温的过程中,由于 TEC 热面会产生很大的热量而且不能立即散除,热辐射会导致降温的时间变长。再者,测试装置暴漏在空气中,散热效率受室温的影响比较大,因此,三种控制算法对系统的控制效果比较接近。

表 1 测试数据表

Table 1 Test data sheet

Target temperature $T / ^\circ\text{C}$	Initial temperature $T / ^\circ\text{C}$	Steady temperature $T / ^\circ\text{C}$	Stabilization time t / s	Deviation value $T / ^\circ\text{C}$
-10	30	-9.92	244	0.08
0	50	0.06	230	0.06
20	80	19.95	221	-0.05
50	10	50.02	178	0.02
100	30	100.08	214	0.08
115	40	115.09	225	0.09

在进行测试时,当实际温度与设定温度的差值大于设定阈值时,使用数字 PID 算法控制;当差值小于阈值时,使用论域可变的模糊 PID 算法实时修正 K_p 、 K_i 、 K_d 三个参数。为了加快 TEC 制冷时热面能量的耗散,减小对 PT1000 测温的影响,除了加装散热片,还使用了大功率抽风机抽取热面的能量。由测试结果图及表 1 中的数据可知,系统能在 250 s 内达到设定温度,并且稳定时误差误差不超过 ± 0.1 °C。

5 结 论

温度是影响半导体激光器正常工作的重要因素之一,可靠的温度控制显得尤为重要。通过对半导体激光器温度控制系统和硬件电路的分析与研究,设计了一种基于论域可变的模糊 PID 控制算法,以 STM32F405 芯片为控制核心的温控系统。同时,优化了测温电路设计,提出了改变测温量程的一种简便方法。实验结果表明,系统能在 250 s 内达到预设温度,稳定之后的控制精度达到 ± 0.1 °C,优于传统 PID 控制器,有良好的应用前景。然而由于实验条件的限制,此方案只测量了一点的温度值,在后续的研究中进行多点测温,可以保证测温的准确性。

参 考 文 献

[1] Luo S Y. Design of high precision temperature controller for narrow line width laser diodes [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019: 2-3.
罗顺焯. 用于窄线宽激光器的高精度温控系统设计 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019: 2-3.

[2] Wu D Y, Gao S X, Cao H Z, et al. Phase transition cooling techniques for high power diode laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(11): 2799-2802.
武德勇, 高松信, 曹宏章, 等. 高功率二极管激光器相变冷却技术 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(11): 2799-2802.

[3] Huang Y Z, Guo X, Song Q H, et al. Preface to "semiconductor laser" topic [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701000.
黄永箴, 郭霞, 宋清海, 等. "半导体激光器"专题前言 [J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701000.

[4] Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Overview of high power semiconductor laser development and related technologies [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114001.
宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述 [J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114001.

[5] Jin C. Development of TEC temperature control system based on the solid laser [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 2.
金策. 某固体激光器 TEC 温度控制系统的研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 2.

[6] Hao Z Q, Li H Z. Design on laser diode temperature control circuit [J]. Advanced Materials Research, 2013, 850/851: 512-515.

[7] Zhou G D. Research and application of temperature control system for high stability laser source [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2019: 4.
周根弟. 高稳定度激光光源温度控制算法研究和实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2019: 4.

[8] Zheng S H, Yang Y H. High precision and accuracy wavelength tuning characteristics of modulated

- grating Y-branch tunable lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0201001.
- 郑胜亨, 杨远洪. 调制光栅 Y 分支可调谐激光器高精度波长调谐特性[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0201001.
- [9] Li J L, Shi Y B, Zhao P F, et al. High precision thermostat system with TEC for laser diode [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1745-1749.
- 李江澜, 石云波, 赵鹏飞, 等. TEC 的高精度半导体激光器温控设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1745-1749.
- [10] Yu H. DSP-based intelligent temperature control system for semiconductor lasers [D]. Changchun: Jilin University, 2012: 4-10.
- 于海. 基于 DSP 的半导体激光器智能温度控制系统[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 4-10.
- [11] Wang Z Q, Duan J, Zeng X Y, et al. Research of precise temperature control systems of high-power semiconductor lasers[J]. Laser Technology, 2015, 39(3): 353-356.
- 王宗清, 段军, 曾晓雁, 等. 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.
- [12] Lu Y, Zhang Y R, Hu X L, et al. Design of semiconductor laser temperature control system based on fuzzy PID[J]. Machinery & Electronics, 2018, 36(6): 50-53.
- 卢燕, 张艳荣, 胡小林, 等. 基于模糊 PID 控制的半导体激光器温度控制系统设计[J]. 机械与电子, 2018, 36(6): 50-53.
- [13] Liang J Q, Dong H B, Ge J, et al. High-precision portable temperature measurement system based on three kinds of sensors [J]. China Measurement & Test, 2016, 42(5): 70-74.
- 梁嘉琪, 董浩斌, 葛健, 等. 多传感器高准确度便携式温度测量仪[J]. 中国测试, 2016, 42(5): 70-74.
- [14] Zheng B C. Design and implementation of high precision temperature control circuit based on PID automatic control [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2020(11): 88-90.
- 郑本昌. 基于 PID 自动控制的高精度温控电路设计与实现[J]. 电子技术与软件工程, 2020(11): 88-90.
- [15] Zhou F E. Application research of integrated temperature sensor AD590 in granary temperature detection[J]. Fujian Computer, 2017, 33(8): 128-129.
- 周福恩. 集成温度传感器 AD590 在粮仓温度检测中的应用研究[J]. 福建电脑, 2017, 33(8): 128-129.
- [16] Wang L G. Design of a temperature measurement and control system based on STC89C52 and AD590 [J]. Internet of Things Technologies, 2019, 9(6): 20-21.
- 王立刚. 一种基于 STC89C52 和 AD590 的温度测控系统设计[J]. 物联网技术, 2019, 9(6): 20-21.
- [17] Lu A X, Liu P K. Measurement range controllable high resolution temperature measurement system based on PT1000 [J]. Automation and instrumentation, 2018, 33(06): 64-68, 91.
- 路傲轩, 刘品宽. 基于 Pt1000 的量程可控高分辨率测温系统[J]. 自动化与仪表, 2018, 33(06): 64-68, 91.
- [18] Zhang T T. Design and FPGA programming of analog current acquisition based on AD7862 [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2018(16): 84-85.
- 张甜甜. 基于 AD7862 的模拟电流采集设计与 FPGA 编程实现[J]. 电子技术与软件工程, 2018(16): 84-85.
- [19] Yang J W. Research on high precision temperature control system based on fuzzy PID control [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018.
- 杨建武. 基于模糊 PID 控制的高精度温控系统研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
- [20] Chen L, Zhan Y D. Temperature control of PEMFC based on variable universe fuzzy PID[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(7): 1-5.
- 陈立, 詹跃东. 基于变论域模糊 PID 的 PEMFC 温度控制[J]. 电子测量技术, 2020, 43(07): 1-5.
- [21] Zeng W J, Jiang Q F, Xie J S, et al. A functional variable universe fuzzy PID controller for load following operation of PWR with the multiple model [J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 140: 107174.
- [22] Yan S L. The design of DSP-based temperature control system for DFB lasers [J]. Laser Journal, 2014, 35(12): 93-95.
- 闫胜利. 基于 DSP 的 DFB 激光器温度控制系统设计[J]. 激光杂志, 2014, 35(12): 93-95.
- [23] Wang L P. PID control system design and automatic tuning using MATLAB/Simulink [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.