

一种大功率 TEC 温控系统的设计

敬奕艳

(深圳技术大学 新材料与新能源学院, 广东 深圳 518118)

摘要: 小功率半导体激光器常采用 TEC 片进行温度控制, 其中, TEC 片工作电压为 5 V, 工作电流低于 4 A 的应用已经有了几种成熟的芯片方案, 而更高电压和电流的 TEC 温控需要自行设计控制系统; 设计了一种基于 AVR 单片机 ATmega128, 适用于大功率 TEC 片的温控系统, 主要技术指标包括: TEC 片工作电压范围 6~24 V, 峰值电流 ≤ 20 A, 控温范围: 0~70 °C, 控温精度 ± 0.05 °C; 使用负温度系数热敏电阻采集温度, 包含温度信息的电压值转化为数字量输入单片机, 单片机根据位置式 PID 控制算法的计算结果输出控制信号, 驱动由两片 BTN7971B 构成的 H 桥电路, H 桥输出电压提供给 TEC 片; 对硬件和软件的实现方法进行了详细分析, 重视控温精度、系统的可靠性设计; 经过实际测试, 可实现前述技术指标, 能满足较大功率半导体激光器的控温要求。

关键词: 温度控制; TEC; PID 算法; ATmega128

Design of a TEC Temperature Control System With High Power

Jing Yiyan

(School of New Materials and New Energies, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118)

Abstract: Low power semiconductor lasers often use TEC chips for temperature control, among which, there are several kinds of mature applications for temperature controller of working voltage of 5 V and working current less than 4 A. For bigger voltage and current, a unique control system needs to be designed. A temperature control system based on AVR single chip microcomputer ATmega128 is designed, which is suitable for high power TEC chip. The main technical specifications include: the working voltage range of TEC chip is 6–24 V, the peak current is up to 20 A, the temperature control range is 0–70 °C, and the temperature control accuracy is ± 0.05 °C. A negative temperature coefficient thermistor is used to collect the temperature, and the voltage containing the temperature information is converted into a digital value and then sent to the single chip microcomputer. According to the calculation result of position type PID control algorithm, the microcomputer outputs the control signals, which drive the H-bridge circuit composed of two BTN7971B, and the H-bridge output voltage is provided to the TEC chip. The realization methods of hardware and software are analyzed in detail, and the temperature control accuracy and system reliability are emphasized in design. After practical tests, the technical specifications can be achieved, and the temperature control requirements of higher power semiconductor laser are met.

Keywords: temperature control; TEC; PID algorithm; ATmega 128

0 引言

半导体热电致冷器 (thermo electric cooler, TEC) 是利用半导体材料的珀尔帖效应制成的。珀尔帖效应是指当电流流过由两种不同半导体材料组成的电偶对时, 电偶对的一端放热、另一端吸热, 如果改变电流流入的方向, 放热和吸热的端也会随之交换, 这一点很适合既需升温又需降温的温控应用^[1]。TEC 温控设备体积小、无噪音、无污染, 广泛应用于光电、机电、医疗、汽车和通讯等领域^[2]。比如 TEC 温控系统已大量应用于中、小功率的半导体激光器, 使激光器温度恒定, 从而输出的激光波长稳定^[3-4]。

目前, 低电压、小功率的 TEC 温控系统已经有了成熟的芯片方案, 比如 ADN8830, MAX1978, LTC1923 等^[5-7], 它们使用方便, 温控精度高, 但只能用于额定电压

不超过 5 V, 电流不超过 4 A 的小功率 TEC 片。对于电压更高, 功率更大的应用, 目前没有现成的芯片方案, 需要自行设计控制系统。

1 系统总体设计

TEC 温控系统的基本功能包括: 设定被控温对象的目标温度, 采集并显示当前实际温度, 根据 PID (比例、积分、微分) 控制算法的计算结果, 控制 TEC 片制冷或制热的能力强弱, 使系统温度达到并维持在目标温度。为实现这些功能, TEC 温控系统一般是以单片机或 FPGA 为核心的小型控制系统。本设计采用的 AVR 单片机 ATmega128 被广泛应用于工业控制和仪器仪表等领域, 是一款性能优良、片上资源丰富、稳定性高的芯片。

考虑将此温控系统设计成既可以独立工作, 又能方便地加入到别的系统中作为一个板卡部件的产品, 该系统的设定温度, 可通过按键输入, 或通过串口从上位机或其它系统接收指令。设置有液晶模块插座, 液晶屏可显示当前实时温度信息, 或不使用液晶屏, 通过串口输出信息。

选择温度传感器, 很重要的因素是精度要高, 是温度采集准确的必要条件。常用的温度传感器有 NTC (负温度

收稿日期: 2020-04-21; 修回日期: 2020-05-15。

基金项目: 深圳技术大学 2017 年度新引进教师科研启动项目 (181430901117005)。

作者简介: 敬奕艳 (1982-), 女, 四川盐亭人, 硕士, 高级工程师, 主要从事电子技术实验教学和电子产品设计方向的研究。

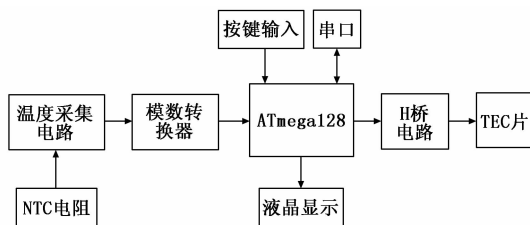


图 1 系统组成框图

系数热敏电阻), PTC (正温度系数热敏电阻), 数字温度传感器 DS18B20 等, 其中, NTC 和 PTC 的测温精度较高。如果对温度精度的要求不高, 可选用 DS18B20, 温度的采集最容易实现, 可以省去温度到电压的转换, 模数转换, 查表等硬件、软件操作, 系统的复杂度大大降低。目前 TEC 温控系统常应用于半导体激光器类的产品, 很多激光模组内部集成了 NTC, 同时还考虑实现较高的测温精度, 因此本设计采用精度为 0.5%, B 值为 3435 的 NTC 采集温度。需要设计温度采集电路, 将由温度变化引起的阻值变化, 转化为电压的变化, 再经过模数转换电路, 转化为数字量才能送入单片机进行下一步处理。

TEC 片有正负两极, 工作时需在两极间接入直流电压。用 TEC 片制冷或制热, 关键在于控制 TEC 片中电流的方向和大小。一些小功率的 TEC 温控采用线性方式控制, 优点是符合 TEC 片对电压纹波小的要求, 缺点是控制用的三极管效率低, 发热多, 温度很高。为满足本系统的大功率要求, 即高电压或大电流, 提升效率, 减少电路元器件发热量, 必须采用场效应管的 H 桥电路来控制电流流向, 用 PWM (脉冲宽度调制) 信号的占空比来控制电流大小, 这是一种开关控制方式, 可能出现输出电压纹波较大的问题, 需增加滤波电路来尽可能削弱纹波。本系统的主要设计指标是: TEC 工作电压范围 6~24 V, 峰值电流 ≤ 20 A, 控温范围: 0~70 °C, 控温精度 ± 0.05 °C。

2 电路设计

2.1 NTC 温度采集电路

设某时刻 NTC 的阻值为 R_{NTC} , 则采样电压 V_{ADC1} 的计算式为:

$$V_{ADC1} = 2.5 \times \left(\frac{R_{NTC}}{R_2 + R_{NTC}} - \frac{R_8}{R_8 + R_1} \right) \times \frac{R_5}{R_3} + 2.5 \quad (1)$$

将 NTC 电阻接于插座 XS1。当温度为 25 °C 时, 阻值为 10 k Ω 。因为后接的 ADC (模数转化) 器件的输入电压范围在 0 V 以上, 而本设计的控温范围在 0 °C 到 70 °C 之间, 所以当温度为 25 °C, 即 NTC 阻值为 10 k Ω 时, 希望输出电压在相对中间的位置, 于是给运算放大器 U1A 的同相输入端设置了半电压 2.5 V。为了配合不同的 ADC 取样电压范围, 比如 0~5 V, 0~2.5 V, 0~4.096 V 等, 可适度调整 R5 和 R6 的阻值, 使得整个设计控温范围对应的电压量都能处于 ADC 取样电压范围内。通过 U1A 放大得到电压量后, 再经过一级电压跟随器, 增大带负载能力, 接入到后续 ADC。为了提高取样精度, 各电阻应采用 1% 或更高

的精度。这里用到两个运放, 可选用轨到轨的双运放封装的型号, 本设计采用 OPA2348A。

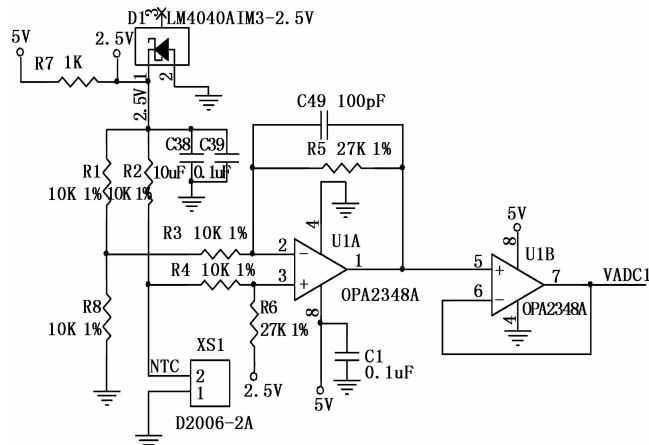


图 2 NTC 温度采集电路

2.2 ADC 电路

选用了 SPI 接口的 12bit 串行 ADC 器件 AD7888, 将模拟电压值转化为数字量, 以便送入单片机进行温度显示和温度控制处理。AD7888 的 SPI 接口有四条信号线, 分别与 AVR 单片机 SPI 接口的四个引脚相连。在图 3 中, 是片选信号, 当需要 AD7888 工作时, ADCLK 是时钟线, 在当前应用中, AD7888 是从属器件, 时钟由控制器件单片机输出。DIN 是 AD7888 控制字输入, 控制字决定其工作模式, 模数转换参考电压的来源等。DOUT 是模数转化的结果输出。VREF 是参考电压, 当前设计是采用 AD7888 外部的电压基准, 是由一颗 LM4040AIM3-4.096 V 产生的, 电压精度为 $\pm 0.1\%$ 。NTC 温度采集电路得到的电压量从 AIN1 脚输入。AD7888 的供电脚 5 V 要做好滤波, 图中接了 10 μ F, 0.1 μ F, 0.01 μ F 3 个陶瓷电容到地。没有用到的输入脚 AIN2-AIN8 不能悬空, 要接地, 避免引入干扰。

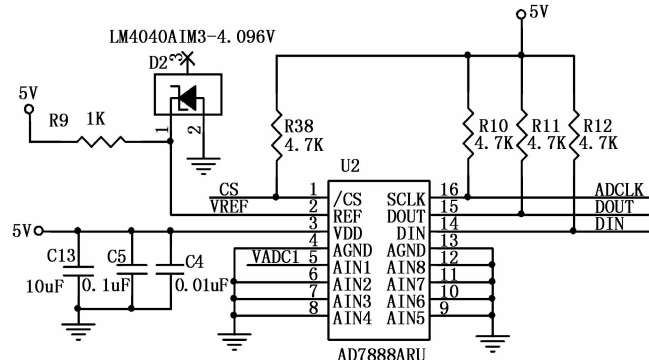


图 3 ADC 电路

2.3 TEC 驱动电路

在一般设计中, H 桥电路由 4 个场效应管组成, 通过 4 个栅极电压控制各个场效应管的导通和截止, 从而控制流过 TEC 片的直流电流的方向。本设计采用集成电路 BTN7971B, 每片包含一个上管 PMOS、一个下管 NMOS 构成半桥以及一个驱动 IC, 两片配合可构成 H 形全桥电路。

选用 BTN7971B 的原因主要是它的参数与本设计的指

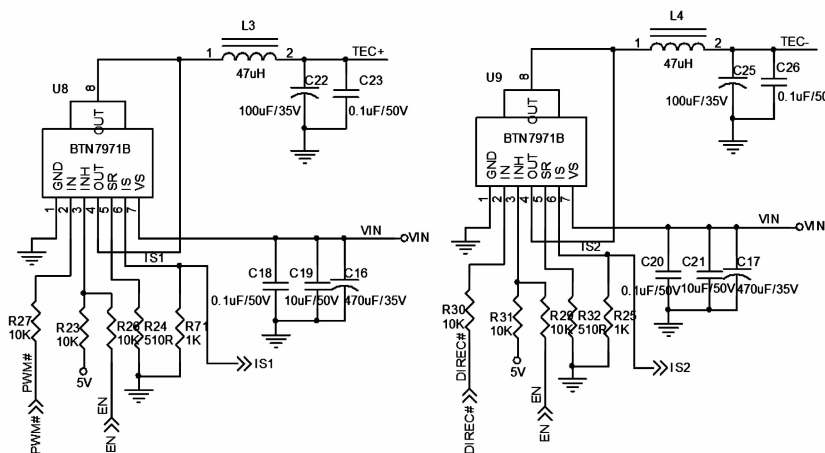


图 4 TEC 驱动电路

标较为匹配,能满足输入电压、电流范围,内部场效应管导通电阻很小,小于 $20\text{ m}\Omega$,在大电流情况下器件的发热量相对小,很适合用于较高电压、较大电流的 TEC 温控电路。配合外部电路,BTN7971B 容易实现过温、过流、过压等保护以及电流上升斜率调整功能,在大功率应用条件下,比简单地用 4 个场效应管构成 H 桥的安全性有很大提升,也比额外增加各种保护电路更简单和经济。此外,用 4 个场效应管来做 H 桥电路,需要 4 个电压控制信号来分别控制 4 个场效应管,要做好信号之间的配合,避开“死区”时间。“死区”是指 H 桥电路同一侧的上管和下管在较短时间内同时导通,这会导致电源对地短路。而采用 BTN7971B,可自动避免“死区”问题,只需 2 个控制信号就可驱动,简化了电路和软件设计。

PWM# 和 DIREC# 是 2 个控制信号,二者配合,DI-REC# 是高或低电平信号,分别对应 TEC 片的加热和制冷,PWM# 是脉冲宽度调制信号,根据 PID 控制算法的结果调整占空比的大小,对应不同大小的 TEC 片工作电流,即不同的制冷或制热的能力。IS1 和 IS2 分别是两个半桥的电流检测信号,连接至 AVR 单片机的 I/O 管脚,系统可获取当前电流值,同时可通过调整 R71 和 R25 电阻值来限制 H 桥的最大电流。两个半桥的输出电压 TEC+ 和 TEC- 分别连接 TEC 片的正负极。如果 TEC 片供电电压的纹波较大,会影响其效率和寿命,因此需要将纹波限制在 10% 以下^[8]。为降低纹波,TEC+ 和 TEC- 的输出端使用了大电感、大电容的 LC 滤波电路。LC 低通截止频率 f 可用 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 来估算,但电感或电容的实际值与标称值有一定差距,且实际的电感和电容都有较大的等效串联电阻,会导致计算与实际效果有较大差距。因此该公式只能用于大致估算,可先计算,再在实际电路中测试输出电压纹波的大小,对 L 和 C 的值进行调整。

2.4 PCB 设计重点

PCB 设计是该温控系统电路实现的一个重要方面。ADC 的模拟量输入和参考电压基准的走线都要尽量短,避开干扰源,在走线两侧伴着走地线,做好防护;电路主要

分为单片机小信号和 TEC 大电流驱动两部分,两者的地要分割,只在一点连接;大电流工作部分的走线都采用了较宽的铜箔,并均匀打上很多大过孔实现良好散热;两片 BTN7971B 是板上温度较高的器件,一方面利用板上铜箔辅助散热,另一方面预留了金属热沉的安装位置。

电路部分还包含 ATmega128 单片机最小系统、按键电路、串口电平转换和从系统供电到 5 V 的转化电路等,这里就不展开详述。

3 软件设计

主程序 main() 函数首先是对系统各组成模块,包括按键、液晶显示、SPI 接口、串口、定时器和 PID 参数进行初始化,程序主体包含一个大循环,图 5 的流程图是此循环中的一次流程。通过 2 按键方式输入所需控制温度,获取 AD7888 转化后的数字量,通过查表方式找到当前的实际温度。调用液晶屏显示函数,显示当前温度。编写 PID 计算函数,采用了分段计算方式,当控制温度与实际温度的差值在 -2 到 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内时才计算 PID 控制量。与 PWM 生成模块的占空比调整范围匹配,根据 PID 控制量输出占空比,根据温度差值是正或负,输出控制方向是加热或制冷。

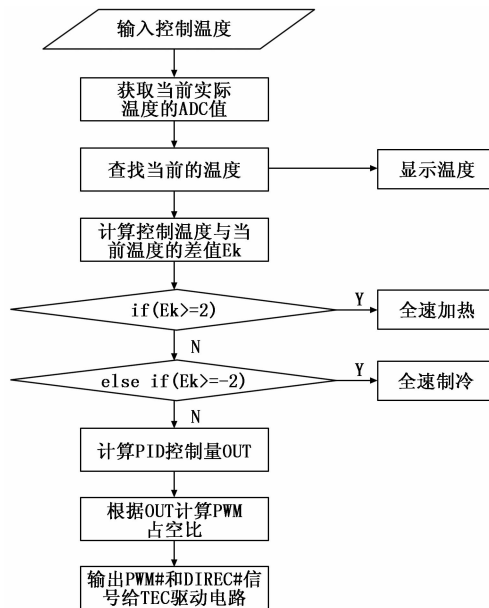


图 5 温控软件流程图

3.1 ADC 芯片 AD7888 的写和读操作

在 AD7888 开启模数转换功能之前,需要单片机向其写入控制字,设置当前进行转换的模拟输入通道(8 个通道中的某一个)、参考电压来源、AD7888 工作模式。开启转换功能后,单片机需要定时从 AD7888 读取转换结果。因此,软件需要编写 AD7888 的写入和读取函数。由于 ATmega128 具备 SPI 接口,可与 AD7888 通过 SPI 通信,使得读、写都能够以一个字节为单位进行,避免了繁琐的按位

操作，简化了软件设计。ATmega128 的 SPI 接口需要根据 AD7888 的读、写时序要求进行初始化。

```
void WriteToAD7888(uchar CtrlWord) //AD7888 控制字写入函数
{
    uchar ControlValue = 0; //定义无符号字符型变量
    ControlValue = CtrlWord; //将控制字赋给变量
    PORTB&=0xFE; //拉低 CS
    SPDR=ControlValue; //将控制字送入 SPI 数据寄存器
    while(!(SPSR&(1<<SPIF))); //判断 SPI 状态寄存器的 SPIF 位是
//否为 1, 为 1 说明数据已传完
    PORTB|=0x01; //拉高 CS, 结束写操作
}
uint ReadFromAD7888(void) //AD7888 读取函数
{
    uint tem_h, tem_l, tem_1, tem_2; //定义无符号整型变量
    PORTB&=0xFE; //拉低 CS
    SPDR=0x00; //写入任意一字节, 启动数据移位
    while(!(SPSR&(1<<SPIF))); //判断状态寄存器的 SPIF 位是否为
//1, 为 1 说明数据已传完
    tem_h=SPDR; //读取高字节
    SPDR=0x00; //写入任意一字节, 启动数据移位
    while(!(SPSR&(1<<SPIF))); //判断状态寄存器的 SPIF 位是否为
//1, 为 1 说明数据已传完
    tem_l=SPDR; //读取低字节
    Delay_us(10); //延时 10us
    PORTB|=0x01; //拉高 CS, 结束读操作
    tem_1=tem_h * 256;
    tem_2=tem_l+tem_1;
    TEMP=tem_2; //TEMP 是采样到的 ADC 的数值
    return TEMP; //函数返回 ADC 值
}
```

在主程序中，对 AD7888 写入的控制字是 0x04，连续读取 4 次 AD 转换结果取平均值，得到比较精确的数字量，从而获得更高的转换精度。

3.2 PID 控制算法的软件实现

PID 控制算法一般有位置式和增量式两大类，相比而言，增量式的计算量小。本设计尝试了这两种算法，位置式在当前的应用中表现更好，因此选择了位置式 PID 算法，计算式如下：

$$OUT = K_p * E_K + K_p * \left(\frac{T}{T_i}\right) * \sum_{k=0}^n E_K + K_p * \left(\frac{T_d}{T}\right) * (E_K - E_{K-1}) \quad (2)$$

其中， OUT 是 PID 算法的输出控制量； $K_p * E_K$ 是比例项， E_K 是控制温度与当前温度的差值， K_p 是比例系数； $\left(\frac{T}{T_i}\right) * \sum_{k=0}^n E_K$ 是积分项， T_i 是积分时间常数， T 是采样周期； $\left(\frac{T_d}{T}\right) * (E_K - E_{K-1})$ 是微分项， T_d 是微分时间常

数， E_{K-1} 是控制温度与前一次温度的差值。

若设 $K_i = K_p * \left(\frac{T}{T_i}\right)$ ， $K_d = K_p * \left(\frac{T_d}{T}\right)$ ， K_i 为积分系数， K_d 为微分系数，则：

$$OUT = K_p * E_K + K_i * \sum_{k=0}^n E_K + K_d * (E_K - E_{K-1}) \quad (3)$$

因为 OUT 的计算中涉及浮点数，计算量非常大，所以采用了分段计算方法：当 $|E_K| \geq 2$ 时，即当前温度与控制温度还相差较大时，不计算 PID 控制量 OUT ，直接用最大的控制量，即全速的加热或制冷；当 $|E_K| < 2$ 时，按公式 (3) 计算 OUT 。

```
pid.Pout=pid.Kp * pid.Ek; //比例输出
pid.SEk+=pid.Ek; //历史偏差总和
DelEk=pid.Ek-pid.Ek_1; //最近两次偏差之差
ti=pid.T/pid.Ti;
ki=ti * pid.Kp; //Ki 积分系数
pid.Iout=ki * pid.SEk; //积分输出
td=pid.Td/pid.T;
kd=pid.Kp * td; //Kd 微分系数
pid.Dout=kd * DelEk; //微分输出
out= pid.Pout+ pid.Iout+ pid.Dout; //PID 控制量
```

3.3 TEC 驱动电路的控制信号产生

前述的 TEC 驱动电路需要两个控制信号：PWM# 和 DIREC#，都是由 ATmega128 产生。本设计采用 ATmega128 的定时计数器 T/C3 来产生 PWM 信号，输出引脚是 PE3，产生的 PWM 波形频率为 15.625 KHz。DIREC# 信号的输出引脚是 PE4，是用作普通 I/O，产生高或低电平。软件首先需要设置输出信号引脚状态，开启 10 位快速 PWM 功能，编写了 PWM_init 函数。

```
void PWM_init(void)
{
    DDRE |=0x1A; //设置 PE3 和 PE4 为输出
    PORTE &=0xF7; //设置 PE3 内部无上拉, PE4 为内部上拉
    TCCR3A=0x83; //T/C3 的通道 A 设置为比较输出模式
    TCCR3B =0x09; //采用 10 位快速 PWM 模式, top 值为 0x03FF(1023)
    TCNT3=0X0000; //设置定时器 3 的初始值为 0
    OCR3A=512; //设置初始占空比为 512/1024=0.5
    ETIMSK=0X00; //T/C3 的中断屏蔽寄存器设置
}
根据 PID 控制量 OUT 的计算结果, 产生不同占空比的 PWM 信号的代码:
if(pid.Ek > 0)
{
    PORTE &= ~(1<<PE4); //需加热, 设置 DIREC# 为 0, 低电平
    if(fabs(out) > 1023)
    { OCR3A = 1023; } //OCR3A 的最大值是 1023
    else
    { OCR3A = fround(fabs(out)); } //将 OUT 值取绝对值、取整, 作为 OCR3A
```

```

}
else if(pid. Ek <= 0)
{
    PORTE |= (1<<PE4); //需制冷,设置 DIREC# 为 1,
    高电平
    if(fabs(out) > 1023)
    { OCR3A = 0; } //OCR3A 的最小值是 0
    else
    { OCR3A = 1023 - fround(fabs(out)); }
}
pid. Ek_1 = pid. Ek; //将当前误差赋值给上一次误差

```

4 实验结果与分析

温控系统设计完成后,主要使用 $4\ \Omega/50\ \text{W}$ 的铝壳电阻进行试验。铝壳电阻两端接 $12\ \text{V}$ 直流电压,发热功率约为 $36\ \text{W}$,能模拟该 TEC 温控系统的一般应用条件。采用 $100 \times 100 \times 5\ (\text{mm})$ 的紫铜板作为导热金属板,可为 2 块 TEC 片同时导热。TEC 片的制冷面均匀涂抹导热硅脂,与紫铜板的一面紧密接触,铝壳电阻固定在紫铜板的另一面中心部位,在紫铜板上铝壳电阻旁边位置钻有小孔,将 NTC 的感温部分完全埋置其中,并以 AB 胶封孔。TEC 片的制热面均匀涂抹导热硅脂,与一个较大体积的金属热沉紧密接触,并安装有风扇顺着热沉的导热方向吹风,带走热量。设计一个好的散热、导热和感温的实验装置对 TEC 温控应用是非常重要的,如果 TEC 片热面的热量不能及时带走,温度过高,冷面就不能输出低温。

该 TEC 温控系统支持的 TEC 片额定电压范围宽,为 $6 \sim 24\ \text{V}$,峰值电流可达 $20\ \text{A}$,可支持多种型号的 TEC 片单独使用,还可将 TEC 片串联或并联使用,以获得更大的制冷或制热功率。在试验中,将 2 块型号为 12708 (额定电压 $12\ \text{V}$,额定电流 $8\ \text{A}$) 的 TEC 片串联使用,对多种不同温度的升温或降温控制进行了调试。

将此温控系统应用在一个出纤光功率最大为 $16\ \text{W}$ 的 $793\ \text{nm}$ 半导体激光器上,将激光器的温度控制在 $25\ ^\circ\text{C}$,激光器内置 NTC 和 TEC 片。从激光器阈值电流 $0.5\ \text{A}$ 到最大电流 $2.5\ \text{A}$ 的范围内,选取不同的电流值来测试温控系统的控温能力。经过多次重复测试,温度波动能保持在 $\pm 0.05\ ^\circ\text{C}$ 以内,从起控到温度稳定的时间一般在 10 分钟以内。图 6 和图 7 是当环境温度为 $28\ ^\circ\text{C}$,激光器工作电流为 $2\ \text{A}$,初始温度为 $40\ ^\circ\text{C}$,控温到 $25\ ^\circ\text{C}$ 的温度变化过程。每 30 秒记录一次温度,约 5 分钟后,温度到达 $25\ ^\circ\text{C}$ 附近,此后存在小幅波动,在 $\pm 0.05\ ^\circ\text{C}$ 范围内。

因为 TEC 温控系统是由多个部分组成的整体,受到多方面的影响,比如被控对象的形态,温度传感器的固定位置和方式,TEC 片的选型和组合,散热条件等,都会影响控温效果。从实验过程发现,一组 PID 参数 (K_p, K_i, K_d) 可能无法满足整个控温范围内的要求,可在软件中根据条件设置几组 PID 参数,也可开放用户微调 PID 参数的功能。

5 结束语

基于 Almega 128 的 TEC 温控系统基本上满足了较大功

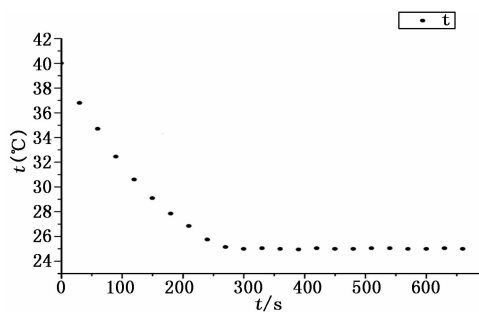


图 6 从初始温度 $40\ ^\circ\text{C}$ 控温到 $25\ ^\circ\text{C}$

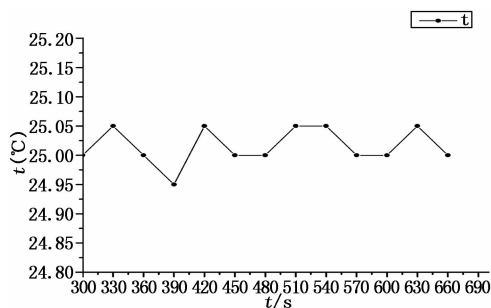


图 7 温度达到 $25\ ^\circ\text{C}$ 后的变化情况

率 TEC 片的应用需求,在控温精度方面的表现较好,在调试和测试的过程中,也表现出较好的可靠性和稳定性。后续还将继续改进设计,改用 16bit 的 ADC 器件,提高测温精度。PID 算法改用变速积分增量方式,有望降低计算复杂度,加快控温响应速度,提高控温精度。现有的 PWM 频率较低,可提高 PWM 频率,就能够减小 LC 滤波的电感量,从而缩小电感的体积,减轻重量。可提高 PWM 占空比调整的精细程度,从而提高控温精度。电路板还可优化缩小,使其更便于嵌入到小体积产品中。目前,TEC 温控系统在各种仪器设备和生活电器等领域有了越来越广泛的应用,本设计的 TEC 温控系统也可尝试与各种其它产品进行融合。

参考文献:

- [1] 刘黎明, 赵亚凤. 一种新型的基于 TEC 的精密温控器设计 [J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12 (6): 61-64.
- [2] 李晓辉, 廖明建, 贺铸, 等. 半导体制冷器在弱散热条件下的制冷性能分析 [J]. 低温工程, 2019, (6), 32-39.
- [3] 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 (6): 1745-1749
- [4] 于泉泉. 基于半导体制冷器的激光器温度控制系统设计 [D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [5] 武新, 李光林, 廖金权. QPQ 氯化盐分析仪恒温控制系统的设计与实验 [J]. 仪表技术与传感器, 2019 (10): 25-29.
- [6] 黄斐, 周郑, 郭汉明. 基于 STM32 的半导体激光器驱动电路设计 [J]. 电子测量技术 2018, 41 (1), 7-11.
- [7] 杜振兴. 高精度低噪声光谱数据采集系统设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [8] 阙秀福, 陈伟, 杨连乔, 等. 基于 TEC 的小型快速高精度恒温系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (8): 2696-2698.