

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.02.05

# 基于半导体制冷片的高精度控温电路系统设计

李丹, 蔡静

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 基于半导体制冷片 (Thermo Electric Cooler, TEC) 设计了一种高精度控温电路系统。本文详细介绍了 TEC 的选型方法, 设计并实现了以单片机为核心的硬件电路, 采用 PID 软件控制算法优化温控参数。在实验中, 选择较大热负载紫铜块作为控温对象进行实验验证, 实验结果表明: 在室温 23℃ 的情况下, 紫铜块的控温范围为 -10~40℃, 控温精度高达 0.01℃。

**关键词:** 半导体制冷片; 选型介绍; 控温系统; 电路设计

**中图分类号:** TB94; TM13

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2017)02-0019-03

## High-precision Temperature-control Circuit System Design Based on TEC

LI Dan, CAI Jing

(Changcheng Institute of Metrology &amp; Measurement, Beijing 100095, China)

**Abstract:** This paper designed a high-precision temperature-control circuit system based on TEC. Introduction was made to the selection method of TEC, realizing a hardware circuit based on single-chip and using PID software control algorithm to optimize parameters. In experiment, choosing the higher thermal load copper block as the temperature control object to do the test verification. The result shows when the ambient temperature is 23℃, the temperature control range of the copper block is -10~40℃. The temperature control precision can be up to 0.01℃.

**Key words:** TEC; selection introduction; temperature control system; circuit design

## 0 引言

半导体制冷片 (Thermo Electric Cooler, TEC) 遵从帕尔贴效应, 通过控制流过 TEC 电流的方向及大小实现其加热制冷转换以及加热制冷量的调节。相比于其他制冷方式, TEC 具有体积小、重量轻、无污染、易于控制等优点, 广泛应用于诸如激光器控温、红外探测器、车载冰箱、恒温箱等多种产品。在实际应用中, TEC 的制冷功率与被控对象散热之间应该有良好的配合, 否则易导致 TEC 制冷不足或者功耗过大。

当电流流过 TEC 时, 热量由 TEC 的一侧传送到另一侧, 表现为一端制冷另一端加热, 如果电流的方向反转则制冷与加热的两端也会反转。制冷时, TEC 电流流向正极导致热量从冷端传到热端, 电流越大, 热量转移的越多。在这个过程中, TEC 两端都产生热量。当电流增长到一定程度后, 冷端由电流产生的热量等于从冷端转移的热量, 冷端的温度停止下降。因此热量要及时的散

出, TEC 必须配合散热装置共同作用。TEC 的冷面通过导热硅脂与被控对象紧密贴合, 热面通过导热硅脂与散热片紧密贴合, 可以消除热阻, 保证 TEC 加热或制冷的效果。

文献[1-5]中介绍的大多都是以较小热负载如 LD 激光器为控温对象的电路设计, 缺少较大热负载控制对象的控温电路设计及实验验证。鉴于此, 本文以 120 mm×120 mm×8 mm 的较大热负载紫铜块作为控温对象, 介绍与之相匹配的 TEC 选型方法, 利用单片机设计硬件电路、PID 控制算法优化温控参数最终实现一种高精度的 TEC 温控电路系统。

## 1 TEC 温控方案设计

温度控制原理图如图 1 所示, 单片机接收到铂电

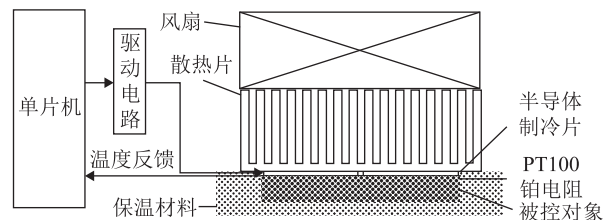


图 1 温度控制原理图

收稿日期: 2016-12-26

作者简介: 李丹 (1990-), 女, 硕士, 从事非接触测温相关课题研究。

阻温度传感器 PT100 的温度反馈,再发出脉冲调制信号 PWM 给驱动电路控制 TEC 的加热或制冷。

### 1.1 选型分析

正确选型可以大大提升 TEC 的应用效率。下面介绍 TEC 的选型方法。

首先,需定义三个负载参数:TEC 工作中热面的最高温度  $T_H$ ( $^{\circ}\text{C}$ ),冷面的最低温度  $T_C$ ( $^{\circ}\text{C}$ ),以及冷面吸收的热量  $Q_{C1}$ (W)<sup>[6]</sup>。

$T_H$ 由系统期望的最大室温  $T_{\text{AMBIENT}}$ 和热沉组装的效率决定。对于大的热负载而言,如果热沉刚刚够用,则

$$T_H = T_{\text{AMBIENT}} + 15 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

$T_C$ 是由环境温度及冷面的最大温差决定。对于热负载较小的被控器件, $T_C$ 等于负载的最小冷面温度  $T_{\text{CT}}$ ;对于热负载较大的被控器件, $T_C$ 低于负载的最小冷面温度  $5^{\circ}\text{C}$ 。

$$T_C = T_{\text{CT}} - 5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

$Q_C$ 是 TEC 制冷面转移的热功率,由主动热负载  $Q_{\text{active}}$ 和从器件及 TEC 冷面传到热沉的被动热负载  $Q_{\text{passive}}$ 共同决定,本文设计方案中无主动热负载,因此

$$Q_C = Q_{\text{passive}} + Q_{\text{active}} \quad (3)$$

被动热负载包括辐射  $Q_{\text{rad}}$ 、对流  $Q_{\text{conv}}$ 、传导  $Q_{\text{cond}}$ 。大多数的应用中,从传感器连接及冷面安装流失的传导热很微小,可以忽略。在大多数条件下,最坏的被动热负载公式为

$$Q_{\text{passive}} = Q_{\text{rad}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{cond}} \quad (4)$$

$$= F\varepsilon\sigma A(T_H^4 - T_C^4) + hA(T_H - T_C) + \frac{kW}{L}(T_H - T_C)$$

式中: $F$ 为形状参数(最坏的情况为1); $\varepsilon$ 为发射率(假定最坏的情况为1); $\sigma$ 为斯蒂芬-波茨曼常数,  $5.667 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ;  $A$ 为制冷底面积,  $\text{m}^2$ ;  $h$ 为热对流传导参数,  $\text{W/m}^2\text{C}$ , 气体强迫对流系数为  $20 \sim 100 \text{ W/m}^2\text{C}$ ;  $k$ 为材料的热传导,  $\text{W/mC}$ , 铜的热传导值为  $386 \text{ W/mC}$ ;  $W$ 为材料的横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $L$ 为热径长度,  $\text{m}$ 。

TEC 选型时按照  $Q_{C1}$  选取。

$$Q_{C1} = \frac{Q_C \cdot T_{\text{max}}}{T_{\text{max}} - \Delta T} \quad (5)$$

式中: $T_{\text{max}}$ 为 TEC 可实现的最大温差; $\Delta T$ 为实际温差。

不同级数的 TEC 对应不同的极限制冷温差,考虑实际的温差  $\Delta T$ ,可对照产品手册选择 TEC 的级数。通过  $Q_{C1}$ 对照 TEC 的产品手册进行选型。

本文的温控对象为  $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  的紫铜块。室温为  $25^{\circ}\text{C}$ ,负载的最低冷面温度为  $-10^{\circ}\text{C}$ ,紫铜块底面积为  $0.0144 \text{ m}^2$ ,  $h$ 取  $30 \text{ W/m}^2\text{C}$ ,在实际应

用中传导热可省略。计算得到  $T_H = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $T_C = -15^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_C$ 为  $28 \text{ W}$ 。TEC 在空气中需要达到的制冷温差为  $\Delta T = 40^{\circ}\text{C} - (-15^{\circ}\text{C}) = 55^{\circ}\text{C}$ ,而通过查找产品手册可知,一级 TEC 在真空中最大温差为  $67^{\circ}\text{C}$ ,因此选用一级 TEC 制冷片,计算得到  $Q_{C1}$ 为  $157 \text{ W}$ 。

由于所需制冷量为  $157 \text{ W}$ ,结合被控对象紫铜块的表面积同时考虑设计应留有余量,选取额定电压  $15.4 \text{ V}$ ,额定电流  $6 \text{ A}$ ,制冷量为  $51 \text{ W}$  的一级制冷片 TEC-12706。为保证 TEC 的工作寿命,TEC 的工作电压不超过额定电压的  $78\%$ ,因此 TEC 的实际工作电压为  $15.4 \text{ V} \times 0.78 = 12 \text{ V}$ 。考虑 TEC 片以及被控对象的大小,为保证控温均匀性,采用 4 片 TEC 并联的方式进行试验。流入热沉的热量  $Q$  为

$$Q = Q_{\text{TEC}} + Q_{C1} = 4 \times 6 \text{ A} \times 12 \text{ V} + 157 \text{ W} = 445 \text{ W} \quad (6)$$

热沉的散热部分选用相应功率的热管散热设备,由于热管的当量导热系数可达  $10^5 \text{ W/m} \cdot \text{C}$ ,是一般金属材料的数百倍乃至数千倍,在自然对流冷却条件下,其散热性能优于普通散热器 10 倍以上,可保证系统热量及时散出。

### 1.2 硬件设计

控温电路由单片机实现,单片机型号为 STC12C5A 60S2,内部集成 2 路 PWM、8 路高速 10 位 A/D 转换,抗干扰性强。

通过液晶显示及按键输入模块输入预设温度值,铂电阻温度传感器 PT100 的阻值随温度变化而变化,采集到的电压值由放大电路放大后反馈给单片机,经过单片机内部 A/D 转换后,单片机将采集的温度值与预设的温度值进行比较判断,通过 PID 计算,输出 PWM 脉冲调制信号给 H 桥驱动电路,调节输出电压大小及方向,进而控制 TEC 的加热制冷量及加热制冷方向的切换。当被控对象的温度低于目标温度时,H 桥朝 TEC 制热的方向按一定的幅值驱动电流;当被控对象的温度高于目标温度时,H 桥朝 TEC 制冷的方向按一定的幅值驱动电流;PWM 信号在 PID 算法的调控下时刻变化。串口通讯可以将系统采集的数据导入电脑进行处理。控温系统原理如图 2 所示。

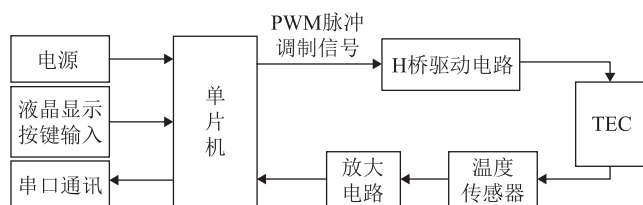


图 2 控温电路原理框图

### 1.3 软件设计

软件算法部分采用 C 语言编程实现，包括主程序，A/D 转换程序、驱动电路程序、按键及显示程序等。其中主程序主要完成初始化并对采集到的温度进行计算。系统主程序的流程图如图 3 所示。

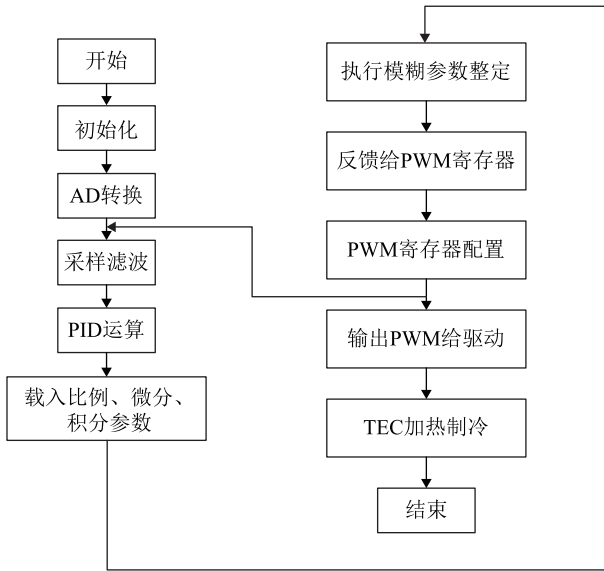


图 3 TEC 制冷控温程序流程图

在 TEC 选型合适的情况下，利用比例-积分-微分控制算法 (Proportion Integrator Differentiator, PID) 优化温控参数，可提升系统的控制精度。其数学模型为

$$u(n) = K_p e(n) + K_i \sum_{k=0}^n e(k) + K_d (e(n) - e(n-1)) \quad (7)$$

式中： $u(n)$  为输出量； $K_p$  为比例调节参数； $K_i$  为积分调节参数； $K_d$  为微分调节参数。

软件算法实现的关键是以上三个参数的调节。调节比例参数用来减小偏差；积分参数用来消除静差；微分参数则根据偏差信号的变化趋势来进行超前调节，从而增加系统的快速性。

## 2 实验验证

将 4 片 TEC 并联，然后用 120 mm×120 mm×8 mm 的紫铜块作为被控对象进行试验验证。4 片并联的 TEC-12706 供电电压为 12 V，电流最大为 24 A。

首先，测试紫铜块在控温到最低温度 -10℃ 时电流的大小，以测试选型是否合理。

将 4 片 TEC 并联后串入 0.01 Ω 的电阻，在系统制冷到 -10℃ 的过程中监测电阻两端的电压，从而计算流过的电流。试验测得整个降温过程中最大电流达到 20 A，对比 4 片 TEC 并联后的额定电流 24 A，达到了预

期的制冷效果，也没有导致功耗过大产生浪费。因此 TEC 选型合适。图 4 是设定温度为 -10℃ 的控温曲线图。

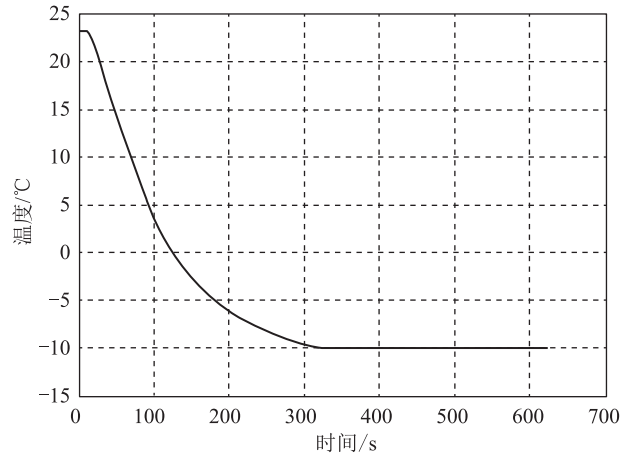


图 4 设定温度为 -10℃ 的控温曲线图

另外，系统采用热管散热，利用表面温度计测得：制冷过程中散热器翅片基板的温度最高为 35℃。表明热管散热良好。

由表 1 可以看出，初期降温速率很快，而到后期速度慢慢变缓，原因是初期被控对象与外界环境温度相差较小，而后期被控对象的温度与外界环境温度相差很大，此时保温隔热至关重要，但仍然不能保证完全隔热，因此降温变得缓慢困难。

表 1 设定温度为 -10℃ 时降温过程中的降温速率

温度/℃	速率/(℃·s <sup>-1</sup> )
23~3	0.20
3~-7	0.10
-7~-10	0.03

其次，测试控温效果。室温环境下，分别设定目标温度为 40，10，0，-10℃，观测系统的温度控制数据，如表 2 所示。

表 2 控温试验测试数据

设定温度值/℃	测得温度值/℃	稳定时间/s
40	40.00	<180
10	10.00	<180
0	0.00	<180
-10	-10.01	<200

从以上实验结果可以看到：40，10，0，-10℃ 的  
(下转第 39 页)

表1为活塞及连接件、专用砝码的质量。表2为活塞的参数,包括零压下的活塞有效面积,活塞压力形变系数以及活塞液体表面张力修正项。将各个参数带入式(1)中计算得到各标称点的实际压力值,进而判断出各量程段的准确度等级。当使用地点的环境温度为20.0℃,且当地的重力加速度为9.8015 m/s<sup>2</sup>时,使用上述的砝码允差在允许范围以内,该活塞式压力计溯源性校准的结果如表3所示。

根据以上分析,对测量范围为1~7 MPa/7~260 MPa的双量程活塞式压力计准确度等级进行划分,其结果如表4所示。分析显示,对于上限为260 MPa的双量程活塞式压力计,仅有测量范围为1~40 MPa的量程段满足0.01级,而180~260 MPa量程段的准确度等级仅为0.05级,在使用过程中需分析各个量程段的准确度等级。双量程活塞式压力计活塞专用砝码无调整腔时,建议给出校准证书,方便客户使用。

表4 测量范围为1~260 MPa的活塞式压力计准确度等级的划分

总量程/MPa	各量程范围/MPa	最大允许误差/%
1~260	1~40	±0.01
	40~100	±0.02
	100~180	±0.03
	180~260	±0.05

注:以读数误差表示最大允许误差。

(上接第21页)

稳定时间均在200 s以内,控温精度可以达到0.01℃。

### 3 结论

本文基于半导体制冷片TEC,设计了一种高精度温度控制电路,应用于较大热负载紫铜块上,试验结果表明:控温范围为-10~40℃,控温精度可达到0.01℃。应用此TEC选型方法,不仅大大提升了控温电路的效率,而且,本文试验结果也验证了TEC选型方法的实用性。同时,利用热管散热器散热解决了TEC制冷系统散热的难题。

#### 参考文献

[1] 徐广平,冯国旭,耿林.基于单片机控制的高精度TEC温

### 3 结论

分析认为,通过上述方法基本可以解决双量程活塞式压力计配备同一套专用砝码所产生的问题。文章通过分享在使用双量程活塞式压力计时总结出的一些经验,对广大压力计量工作者来说具有一定的借鉴意义。

#### 参考文献

- [1] Dadson R S, Lewis S L, Peggs G N. The Pressure Balance: Theory and Practice[M]. London: HMSO, 1982.
- [2] 翟丽利,吕胜茹.双活塞式压力计配套专用砝码的问题分析及解决方法[C]/全国压力计量与测试技术学术交流会议论文集.北京:计测技术,2014:49-51.
- [3] 国家质量检验检疫总局.JJG 59-2007 活塞式压力计检定规程[S].北京:中国计量出版社,2007.
- [4] 李海兵,卓华,赵亿坤,等.活塞有效面积测量方法的分析与比较[J].计测技术,2015,35(5):50-52.
- [5] 国家质量检验检疫总局.JJG 99-2006 砝码检定规程[S].北京:中国计量出版社,2006.
- [6] 李燕华.活塞压力计专用砝码质量在计算和修正中的问题[J].计量技术,2007(4):50-52.
- [7] 李海兵,悦进,卓华,等.活塞式压力计专用砝码的探讨[J].计测技术,2013,33(4):77-80.
- [8] 张金亮.气体活塞式压力计压力专用砝码质量的检定问题[J].计测技术,2014,34(4):83-85.
- [9] 李海兵,塔伊尔·斯拉甫力,卓华.活塞式压力计和高度差测量的研究[J].自动化仪表,2016,37(2):76-78.

控[J].激光与红外.2009,39(3):253-256.

- [2] 黄嵘.基于单片机的TEC温度控制设计[J].应用天地,2013,13(6):62-64.
- [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.2014,43(6):1745-1749.
- [4] 黄岳巍,崔瑞祯.基于TEC的大功率LD恒温控制系统的研究[J].红外与激光工程,2006,35(2):144-147.
- [5] 张悦玲,杨绍岩,张晓娟.基于MSP430F449的半导体激光器温控系统设计[J].光电技术应用,2012,27(3):11-13.
- [6] Optimizing Thermoelectric Temperature Control Systems [Z]. Wavelength, 2005: 1-14.