

文章编号: 1672-8785(2010)11-0020-05

基于 MAX1978 的非致冷红外 焦平面温度控制系统

阙 旻 蒋 宁 刘子骥 蒋亚东

(电子科技大学光电信息学院电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川成都 610054)

摘 要: 温度不稳定是影响非致冷红外焦平面探测器性能的重要因素之一。设计了一种基于 MAX1978 的温度控制系统。该系统采用闭环控制结构, 通过外部 PID 补偿网络控制驱动 TEC 模块, 实现了对探测器温度的控制。实验结果表明, 该系统能够有效地对焦平面温度进行控制, 其精度可达到 0.06 °C。

关键词: 温度控制; PID; TEC; MAX1978

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.11.005

MAX1978-based Temperature Control System for Uncooled Infrared Focal Plane

QUE Min, JIANG Ning, LIU Zi-ji, JIANG Ya-dong

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Temperature instability is one of the important factors affecting the performance of an uncooled infrared focal plane detector. A MAX1978-based temperature control system with a closed-loop control structure is designed. The control system drives a thermoelectric cooler module via an external proportional-integral-derivative compensation network and the temperature of the detector is controlled. The experimental result shows that the system can effectively control the temperature of the focal plane detector with an accuracy of 0.06 °C.

Key words: temperature control; PID; TEC; MAX1978

1 引言

非致冷红外焦平面阵列有微测辐射热计焦平面阵列和热释电探测器焦平面阵列等。相对于低温工作的致冷光子型焦平面阵列而言, 其成本更为低廉且便携性更高, 拥有广泛的应用领域。但是非致冷红外焦平面阵列对温度的稳定性和均匀性有着很高的要求。为了保证非致

冷红外焦平面的性能, 我们就需要对其进行精确的温度控制。因此, 对于整个非致冷红外焦平面探测系统而言, 有一个高性能的温度控制系统显得尤为重要。

2 温度控制原理

热电制冷器 (TEC) 又称温差电制冷器或半导体制冷器。它是一种利用热电效应 (电荷载体

收稿日期: 2010-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60806021)

作者简介: 阙旻 (1984-), 男, 四川仁寿人, 硕士研究生, 主要从事非致冷红外焦平面测试系统方面的研究。E-mail: slavakgb@163.com

在导体中运动形成电流) 的制冷器。由于电荷载体在不同材料中处于不同的能级, 当它从高能级向低能级运动时, 便会释放出多余的能量; 反之, 当它从低能级向高能级运动时, 则会从外界吸收能量。因此, 能量在两种材料的交界面上以热量的形式被吸收或释放。

在 TEC 制冷片中, 半导体通过连接金属导流片构成回路。当电流由 N 通向 P 时, 电场使 N 中的电子和 P 中的空穴反向流动。它们产生的能量来自晶格的热能, 于是导流片上发生吸热, 而在另一端发生放热, 从而产生温差。帕尔帖模块也称作热泵, 它既可以用于致热, 也可以用于制冷。半导体制冷片就是一个热传递工具。只要热端 (被冷却物体) 的温度高于某温度, 半导体制冷器便开始发挥作用, 使冷热两端的温度逐渐均衡, 从而起到制冷作用。

图 1 是利用 TEC 进行温度控制的原理框图。NTC 热敏电阻感知目标温度, 并将电压信号传送到斩波自稳零仪表放大器。该放大器将当前温度电压信号与设定点的温度电压进行对比后, 产生一个电压差。这一偏差电压信号经外部 PID 电路被传送到积分放大器。PWM 控制器通过驱动 FET 向 TEC 输出具有一定大小的电流, 以使目标温度逐渐趋于设定温度。

3 温控电路设计

3.1 MAX1978 简介

为了满足设计要求, 本文选用了 Maxim Integrated Products 公司的 MAX1978 集成温度控制器。

MAX1978 是用于帕尔贴热电制冷器 (TEC) 模块的最小、最安全、最精确的单片温度控制器。片内的 FET 以及热控制环电路在提供高效率的同时, 还尽可能地减少了外部元件。500kHz/1MHz 可选的开关频率和独特的纹波消除电路在降低噪声的同时, 也优化了元件的尺寸和效率。对内置 MOSFET 的开关速度进行了优化, 减少了噪声和 EMI。超低漂移的斩波型放大器能够维持 $\pm 0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度稳定性。MAX1978 直接控制的是输出电流, 而不是电压, 消除了浪涌电流。独立的加热 / 制冷电流和电压限制提供了最高级的 TEC 保护。

MAX1978 工作于单电源, 通过在两个同步 buck 稳压器输出之间连接 TEC, 可提供 $\pm 3\text{A}$ 双极性输出。双极性工作能够实现无“死区”温度控制, 从而避免轻载电流时的非线性问题。该方案通过少许加热或制冷就可避免控制系统在调整点非常接近环境工作点时的振荡现象。此外, 还可通过模拟控制信号精确地设置 TEC 电流。

用一个斩波自稳零仪表放大器和一个高精度积分放大器组成一个比例积分 (PI) 或比例积分微分 (PID) 控制器。仪表放大器连接外部 NTC 或 PTC 热敏电阻、热电偶或半导体温度传感器。它所提供的模拟输出用来监测 TEC 的温度和电

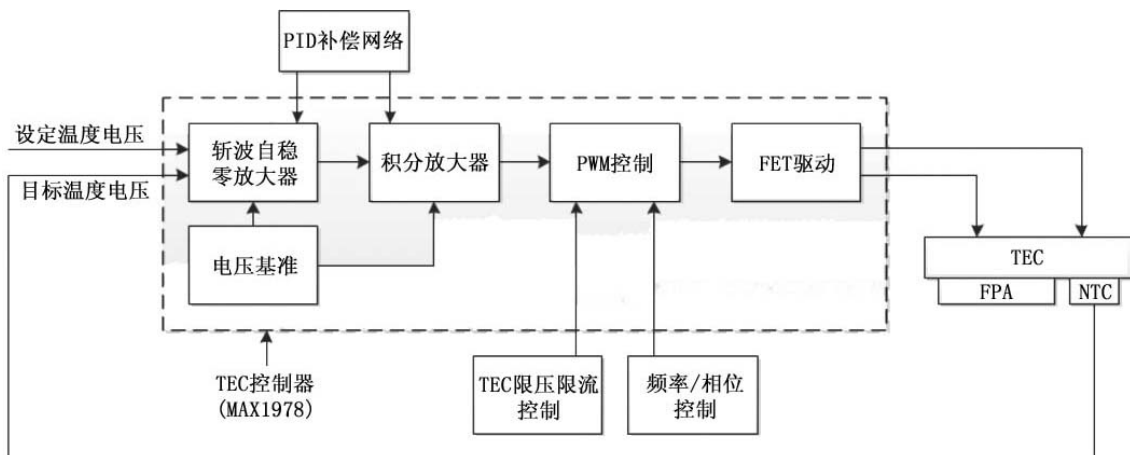


图 1 温度控制的原理框图

流。另外,独立的温度过高/过低输出用来指示 TEC 温度何时超出正常范围。片内电压基准为热敏电阻电桥提供偏置电压^[1]。

3.2 温度点设定

MAX1978 的引脚 18(FB-) 和引脚 19(FB+) 分别连接到斩波自稳零仪表放大器的反向和同向输入端。FB- 为目标温度电压的连接端,设定的温度电压则连接至 FB+。如图 2 所示,通过一个 H 型电桥即可完成温度设定工作。其中, RTH 代表 NTC 热敏电阻, R1 与 R2 的阻值相等, R3 则与 NTC 热敏电阻在设定温度点的阻值相等。以 UL01011 为例,它的内部集成有 NTC 热敏电阻,其阻值在 30℃ 时为 3.9kΩ^[2]。若要将温度稳定在 30℃, R3 可选用 3.9kΩ 的高精电阻。即使 MAX1978 片内提供的参考电压出现纹波,由于 FB- 和 FB+ 的电压是通过对同一个电压源分压得到的,所以这并不会影响系统的性能和精度。本系统除使用电桥之外,还可使用单片机和 DAC 方式来提供所需的设定电压,这将会使得温度设定变得更加灵活。当 FB- 和 FB+ 两端的电压值相等(即电桥平衡)时,表明目标温度达到了设定点温度。

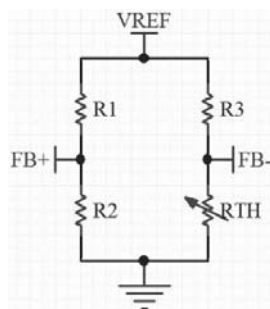


图 2 H 型电桥

3.3 PID 网络设定

PID 控制器是工业控制应用中常见的反馈回路部件,主要适用于基本线性和动态特性不随时间变化的系统。它首先把收集到的数据和一个参考值进行比较,然后用该差别计算出新的输入值,从而让系统的数据达到参考值或者与参考值保持一致。与其他简单控制运算不同,PID 控制器可以根据历史数据和差别出现率调

整输入值,这样可以使系统变得更加准确、更加稳定。由数学方法可证明,在其他控制方法导致系统存在稳定误差或过程反复的情况下,使用一个 PID 反馈回路便可以保持系统的稳定。

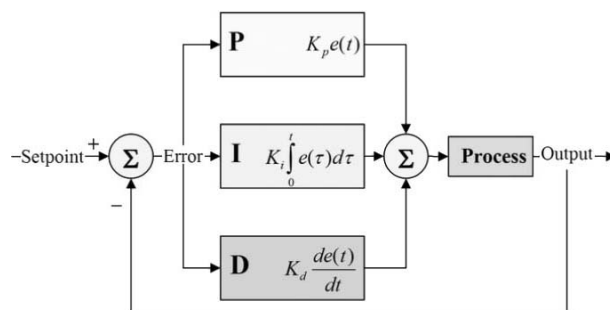


图 3 PID 控制器的原理框图

PID 控制器的原理框图如图 3 所示。它由比例单元 P、积分单元 I 和微分单元 D 组成,并通过 K_p 、 K_i 和 K_d 三个参数设定,其数学模型为

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

P、I、D 三种算法都是用加法调整被控制数值的。而实际上,这些加法运算中的大部分变成了减法运算,因为被加数总是负值。

比例(P):控制当前;误差值和一个负常数 P(表示比例)相乘,然后和预定值相加。P 只是在控制器输出与系统误差成比例的时候才成立。比如,NTC 热敏电阻的当前温度是 10℃,设定值是 20℃。那么它在 10℃ 时会输出 100%;在 15℃ 时会输出 50%;在 19℃ 时输出 10%;当误差为 0 时,控制器输出也是 0。

积分(I):控制过去;误差值为过去一段时间内的误差和,将其乘以一个负常数 I,然后再与预定值相加。I 通过过去的平均误差值找到系统的输出结果和预定值的平均误差。一个简单的比例系统会发生振荡,在预定值附近来回变化,因为系统无法消除多余的纠正。通过加上一个负的平均误差比例值,系统误差的平均值就会减少。因此,这个 PID 回路系统最终会在预定值处稳定下来。

微分(D):控制将来;计算误差的一阶导数,并将其和一个负常数 D 相乘,最后与预定

值相加。这个导数控制会对系统的改变作出反应。导数结果越大, 控制系统对输出结果作出的反应就会越快。这个 D 参数也是 PID 被称为可预测的控制器原因。D 参数对减少控制器的短期改变很有帮助。

PID 补偿网络是 TEC 温度控制的关键部分, 是影响 TEC 控制器响应速度和温度稳定性的一个重要因素^[3]。为了达到快速响应, 也就是实现短的设定时间和高的温度稳定性, 补偿网络必须具备精确匹配热负载的特性, 但是要做到这一点并非易事。一个精确匹配的补偿网络留给热控制环稳定性的容限较少^[4]。MAX1978 采用外部补偿网络 (见图 4) 时, 仅需要几个电阻和电容, 并可根据不同的应用设计不同的补偿网络, 从而获得最佳效果。根据分析计算, 我们得到一组适合本系统的 PID 参数值: $C1=0.47\mu\text{F}$, $R1=1\text{M}\Omega$, $R2=1\text{M}\Omega$, $R3=100\text{k}\Omega$, $C2=10\mu\text{F}$, $C3=0.047\mu\text{F}$ 。

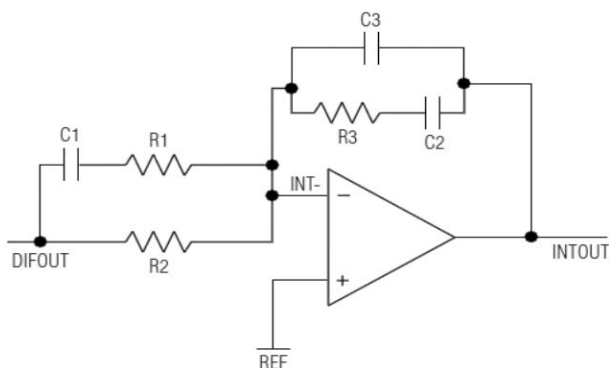


图 4 MAX1978 的 PID 控制网络

3.4 其它外围电路

为了获得更高的效率和精准的 1.5V 参考电压, 本系统采用 5V 电源供电, 并选用了 Linear Technology 公司产的 LT1529 电源芯片。该芯片可提供最大值为 3A 的电流, 并且具有低压降和良好瞬态响应等特性。在制作电路板时, 我们将 GND 和 PGND 分开布置以减少信号串扰。

引脚 36(FREQ) 用来设置片内晶振的开关频率。当连接至地时, 开关频率为 500kHz; 当连接至 VDD 时, 开关频率为 1MHz。为了获得更高的效率, 本系统设定开关频率为 500kHz。

针对不同的 TEC 模块, 我们还需要设定电压和电流限制, 包括最大电压、最大正向电流和最大反向电流。根据 MAX1978 的数据表, 引脚 41(MAXV) 上的电压值 V_{MAXV} 决定了 TEC 两端的最大电压:

$$V_{TEC(MAX)} = 4V_{MAXV} \quad (2)$$

UL01011 内部集成的 TEC 模块两端的最大电压为 4V, 因此需要将一个电阻分压网络连接到引脚 41(MAXV) 上, 且最大电压不能超过 1V。

引脚 39(MAXIP) 和引脚 40(MAXIN) 分别用来设定 TEC 的最大正向和反向电流。

$$I_{TECP(MAX)} = \frac{V_{MAXIP}}{10R_{SENSE}} \quad (3)$$

$$I_{TECN(MAX)} = \frac{V_{MAXIN}}{10R_{SENSE}} \quad (4)$$

式中, V_{MAXIP} 和 V_{MAXIN} 分别为引脚 39 和引脚 40 上的电压。微电阻 R_{SENSE} 连接在引脚 47(CS) 和引脚 48(OS1) 之间。通过选取不同阻值的微电阻 R_{SENSE} 就可以改变流经 TEC 的最大电流值。

4 性能测试结果

MAX1978 具有高温和低温报警指示功能。当设定温度电压与当前目标温度电压之差 (V_{FB+} 与 V_{FB-} 之差) 小于 20mV 时, 引脚 12($\overline{OT}$) 和引脚 13($\overline{UT}$) 就会拉低。对于 UL01011 内集成的 4.7k Ω &25 $^{\circ}\text{C}$ NTC 热敏电阻来说, 20mV 对应于大约 1.2 $^{\circ}\text{C}$ 的温差。将引脚 12($\overline{OT}$) 和引脚 13($\overline{UT}$) 与 LED 相连, 便可通过 LED 的亮灭直观判断出目标温度是否与设定温度相等。

为了评估整个温控系统的性能, 我们测量了目标温度电压 (FB- 脚的电压), 并通过 FB- 脚的电压计算出了当前目标温度。测试是在室温下进行的, 我们将目标探测器的温度稳定在 25 $^{\circ}\text{C}$, 即将 FB+ 脚的电压设定为 0.75V, 然后检测 FB- 脚的电压变化。该电压随时间的变化曲线如图 5 所示。从图中可以看出, 在刚通电时, FB- 脚的电压有较大幅度的波动; 经过大约 20s 后, FB- 脚的电压逐渐趋于稳定。最终 FB- 脚的电压在 0.751V ~ 0.752V 之间波动, 对应温度

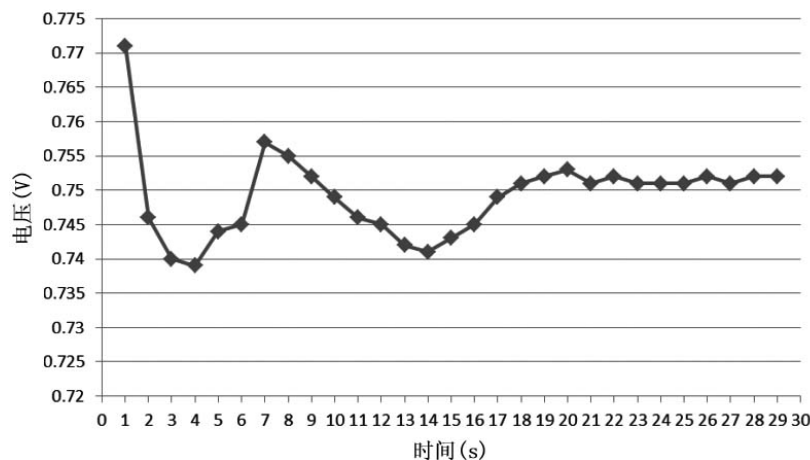


图 5 目标温度电压与时间的关系

的波动范围约为 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。温漂范围很小, 达到了探测器正常工作的要求。

以上测试表明, 该温控电路可以有效地控制 TEC, 从而保证红外探测器在设定温度下稳定地工作。

参考文献

- [1] MAX1978/MAX1979 datasheet [Z]. Maxim Integrated Products, 19-2490, Rev 1, 2/07.
- [2] UL01011 datasheet [Z]. ULIS, 02.02.04/UP/DRD/NTC004-6.
- [3] 郑兴, 蒋亚东, 罗凤武, 等. 基于 ADN8830 的非致冷红外焦平面温度控制电路设计 [J]. *现代电子技术*, 2009, **33**(24): 154-156.
- [4] 覃喜庆, 曾祥鸿, 董静, 等. 基于 ADN8830 的高性能 TEC 控制电路 [J]. *光学与光电技术*, 2004, **2**(1): 20-22.
- [5] of diamond films [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**(4): 1896-1899.
- [6] Huang Z M, Chu J H. Optimizing precision of fixed-polarizer, rotating-polarizer, sample, and fixed-analyzer spectroscopic ellipsometry [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(34): 6390-6395.
- [7] 苏青峰, 夏义本, 王林军, 等. 不同取向金刚石薄膜的红外椭圆偏振光谱特性研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(2): 86-89.
- [8] Bruggeman D A G. The calculation of various physical constants of heterogeneous substances, I: the dielectric constant and conductivities of mixtures composed of isotropic substances [J]. *Ann. Phys. Lpz.*, 1935, **24**: 636-679.
- [9] Collins R W, Lee J, Veerasamy V S, et al. Analysis of the ellipsometric spectra of amorphous carbon thin films for evaluation of the sp³-bonded carbon content [J]. *Diamond Relat. Mater.*, 1998, **7**: 999-1009.
- [10] Michaelson S, Ternyak O, Hoffman A, et al. Hydrogen bonding at grain surfaces and boundaries of nanodiamond films detected by high resolution electron energy loss spectroscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(10): 103104.
- [11] Zhang W J, Jiang X, Xia Y B. The selective etching with H⁺ ions and its effect on the oriented growth of diamond seed crystals by vapor deposition [J]. *J. Appl. Phys.*, 1968, **39**(6): 2915-2922.
- [12] Angus J C, Will H A, Stanko W S. Growth of diamond seed crystals by vapor deposition [J]. *J. Appl. Phys.*, 1968, **39**(6): 2915-2922.
- [13] Chen C F, Chen S H, Ko H W, et al. Low temperature growth of diamond films by microwave plasma chemical vapor deposition using CH₄+CO₂ gas mixtures [J]. *Diamond Relat. Mater.*, 1994, **3**(4-6): 443-447.
- [14] Xia Y B, Mo Y W, Wang Y, et al. Nucleation mechanism of polycrystalline diamond film deposited on ceramic alumina by microwave plasma chemical vapor deposition [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1996, **13**(7): 557-560.
- [15] Li Y S, Tang Y, Chen W, et al. Plasma enhanced diamond deposition on steel and Si substrates [J]. *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, 2009, **22**(5): 321-329.
- [16] Guo L, Chen G H. High-quality diamond film deposition on a titanium substrate using the hot-filament chemical vapor deposition method [J]. *Diamond Relat. Mater.*, 2007, **16**(8): 1530-1540.

(上接第 14 页)