

小型高精度红外黑体辐射源的设计

曹海源, 万强, 初华, 米朝伟
(武汉军械士官学校光电技术研究所, 武汉 430075)

摘要: 红外黑体辐射源是实现红外成像系统性能检测和定标的关键设备, 针对红外热像仪便携式野战测量设备小型、轻量、高精度的要求, 设计了黑体辐射部件的结构、硬件电路和控制软件。采用紫铜辐射面、热电制冷器、散热片等设计了小型高效的热辐射源部件, 采用高精度恒流源驱动测温电桥, 实现了 $0.0122\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度采集精度, 采用铂热电阻的分度表函数及牛顿迭代算法, 使采集电压与实际温度的转化精度达 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该红外黑体辐射源的辐射面发射率、温度控制精度、外形尺寸等各项指标通过测试, 达到设计要求, 取得了理想的应用效果。

关键词: 红外辐射; 黑体; 温度采集; 牛顿迭代算法

中图分类号: V271.4; TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)12-0063-05

Design of a Minitype and High-Precision Infrared Blackbody Radiator

CAO Haiyuan, WAN Qiang, CHU Hua, MI Chaowei

(Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Noncommissioned Officers School, Wuhan 430075, China)

Abstract: An infrared blackbody radiator is a pivotal part of test and calibration equipment for an infrared system. To meet the requirements of minitype, light weight and high-precision for portable field test equipment of the infrared imager, we designed the structure, control circuit as well as the software of blackbody radiator. The blackbody radiator component, small and highly efficient, was composed of red-copper radiant area, thermoelectric cooler and thermal sink. The temperature acquisition precision of $0.0122\text{ }^{\circ}\text{C}$ was realized by using the bridge for measuring temperature driven by the constant current. The conversion precision of $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ between the acquired voltage and the real temperature was achieved by using the indexing function of platinum resistance and the Newton iteration method. Test result shows that the emissivity, temperature control precision and the size of the IR blackbody radiator can meet the requirement, and the infrared blackbody radiator has successful application effect.

Key words: infrared radiation; blackbody; temperature acquisition; Newton iteration method

0 引言

相对于可见光辐射, 红外辐射具有更强的透过雾、雨、雪的能力, 因而, 红外成像系统的作用距离更远^[1], 因此, 红外成像系统在军事、遥感、探测领域有着广泛的应用。近年来, 由于温度测量精度高和可非接触式测量等特性, 红外成像系统已渗透到医学、科研及工业检测等领域。红外黑体辐射源是红外热成像设备和红外探测设备外场性能测试和定标的主要设备之一^[2]。

其作用是在一定区域面积范围内提供一个稳定、均匀的温度场, 配合红外准直光学系统和红外靶标, 为被测红外热像设备提供标准的测试目标源, 完成 MRTD、MDTD、NETD、MTF 等指标测试和性能评估^[3]。红外黑体辐射源的温控精度对指标检测的精度起决定性作用^[4]。在本项目中, 要实现一种针对红外热像仪的便携式野战测试设备, 由于空间、重量的限制, 必须要求红外黑体辐射源体积小、重量轻, 同时要保证 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温控精度。

1 技术指标及总体设计方案

1.1 技术指标

根据红外指标的检测精度要求、使用环境要求及

红外检测设备的便携要求,对红外黑体辐射源的总体指标要求如下:1)温控精度为 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$;2)差分温度范围为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$;3)温度响应时间为 $\Delta T=2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时小于 30 s ;4)短时稳定性小于 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}@10\text{ min}$;5)温度均匀性小于 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}@\Delta T<3\text{ }^{\circ}\text{C}$;6)辐射面发射率大于等于 95% ;7)辐射面直径为 30 mm ;8)环境温度为 $(20\pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$;9)外形尺寸(不含控制电路)小于等于 $70\text{ mm}\times 70\text{ mm}\times 90\text{ mm}$;10)供电电源为 $12\text{ V},4\text{ A}$ 。

1.2 总体设计方案

红外黑体辐射源的产生可以采用单黑体方案,也可采用双黑体方案来实现^[5],从系统体积及便携式要求考虑,本文采用单辐射黑体方案,其系统组成如图1所示。

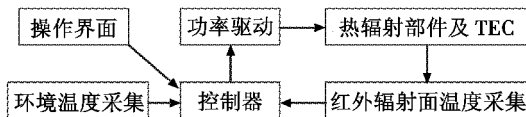


图1 红外黑体辐射源系统组成

Fig.1 Structure of infrared blackbody system

主要包括控制器、功率驱动、温度采集、热辐射部件等。其中控制器是系统的核心,工作原理是:用户通过交互界面设定所需的辐射源温差,控制器有两路温度采集通道,A通道实时采集环境温度,B通道实时采集热辐射面的当前温度,控制器根据设定温差值、环境温度值、热辐射面温度值信息通过PID控制算法,计算出当前的控制参数,控制功率驱动电路驱动电热能转换器件,实现制冷或加热,从而改变热辐射源的当前温度值。控制器在完成温度采集、温度控制的同时,还实时将当前温度数据传送到交互界面,用于显示。电热能转换器件采用热电制冷器(TEC)。

2 热辐射部件结构设计

热辐射部件的作用是将功率驱动提供的电流转化为热能,将热能传导到黑体辐射面上,产生均匀精确的温度场^[6]。为了达到热能及时快速转换的目的,必须具备良好的热传导特性,其结构设计如图2所示,主要由辐射面、隔热层、热电制冷器、散热器、风扇、热敏探头等组成。

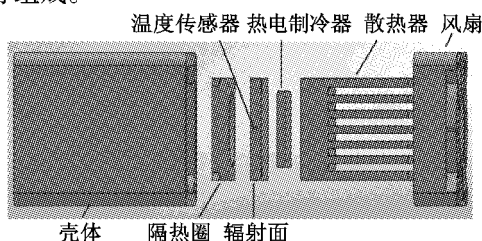


图2 热辐射部件结构设计图

Fig.2 Structure of thermal radiator

为了保证高热容、高发射率,辐射面采用紫铜材料,并且要一定的厚度,经过反复实验,最后确定采用 4 mm 的紫铜板,温度响应速度及控制精度可以达到指标要求。紫铜辐射面的中央位置留有小孔,用于安装温度采集电阻。为了提高紫铜板的发射面的辐射率,在黑体漆中掺入热辐射率高达 97% 的炭黑材料,并且采用等离子喷涂工艺保证了高均匀性和高粘连强度。热电制冷器通过导热硅脂一面与辐射面粘合在一起,另一面与散热器粘合,散热器的散热槽端安装风扇。壳体为整个电热传导系统提供一个相对稳定的热交换空间,以减少外界空气流动干扰。壳体的外端面开有辐射通孔,采用导热系数低的环氧树脂材料加工成隔热层,用于隔断外界与壳体内部的热交换,隔热层的中间开有通孔,提供热辐射通道。

3 电路设计

电路设计是控制系统的核心,驱动热电制冷器以一定频率和脉宽的电流脉冲正向或反向导通,形成正负温差。在热辐射部件结构确定以后,红外黑体的温控精度、响应时间、稳定性等很大程度上取决于控制电路性能的优劣,而为了达到设计指标要求,设计了高精度的温度采集电路单元和功率驱动电路单元。电路组成如图3所示。

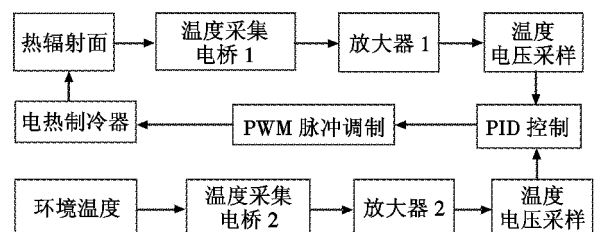


图3 电路模块组成框图

Fig.3 Structure of control circuit

由于要同时采集环境温度和热辐射面的温度,所以采用双路AD采集,采集前端采用精密电阻和铂热电阻构成测温电桥,电桥的输出电压经过增益放大电路后输入到高精度AD采集单元,PID控制通过软件编程实现,根据理想温差值和当前温差值计算出实时调节量,转化为PWM调制信号,然后经驱动功率电桥后驱动TEC进行电热能转换,构成闭环控制,通道2负责采集环境温度,相当于给闭环系统加入一个扰动。

在电路中,温度采集单元是影响温度采样精度的关键,从某种程度上也决定了温度控制精度的高低,所以在里详细讨论。

铂电阻以其性能稳定、测温范围宽、易标定及互换性好等特点,在温度测量中有着最为广泛的应用^[7]。本文采用铂热电阻作为温度探测器件。但是像其他热

电测温元件一样,铂电阻的热电阻与温度之间也存在非线性关系,尤其在高温端更为严重。因此设计温度采集电路时必须克服其非线性影响。采用恒流源桥电路可有效消除非线性误差,如图 4 所示。

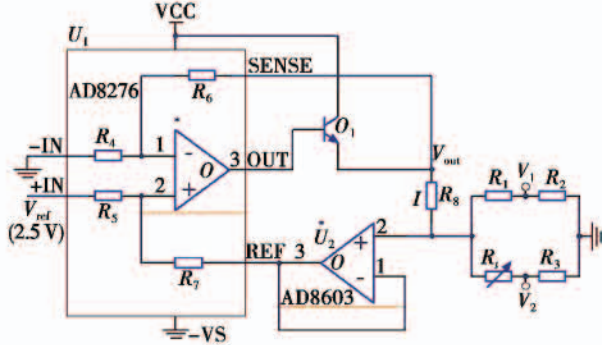


图 4 恒流驱动测温电桥

Fig. 4 Principle diagram of current-driven bridge for temperature test

恒流源采用差分放大器 AD8276 和运放 AD8603 来实现。AD8276 具有低输出噪声(f 为 0.1 ~ 10 Hz 时,噪声小于 $2 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$)、低增益误差(0.01%)、低增益漂移(5 ppm/°C)等特性,AD8603 是低电流噪声($0.05 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$)、低偏置电流(1 pA)放大器,可有效消除负载变化引起的电流漂移。 R_1, R_2, R_3, R_t 组成电桥,设其等效电阻为 R_{load} ,可计算出 R_8 中的电流为

$$I = \frac{V_{\text{ref}} * \left(\frac{R_7 + \frac{R_6}{R_4} * \frac{R_7}{R_5}}{R_8 * \left(1 + \frac{R_7}{R_5} \right) + R_{\text{load}} * \left(\frac{R_7}{R_5} - \frac{R_6}{R_4} \right)} \right)}{\quad} \quad (1)$$

若取 $R_4 = R_5 = R_6 = R_7$, 则

$$I = \frac{V_{\text{ref}}}{R_1} \quad (2)$$

R_8 选用 1% 精度的电阻,以得到恒流输出,而由于运放的输入端电流可以忽略,所以,恒流 I 直接流经电桥。

R_1, R_2, R_3, R_t 分别为桥臂电阻,与运放 U_1, U_2 一起构成恒流桥电路,通过检测 V_1 端和 V_2 端的电压差来计算温度的变化。由上述对 U_1, U_2 的分析,相当于有一个恒流源流经电阻桥,电桥电路的输出电压 V_1, V_2 两端的电压为

$$V_0 = V_2 - V_1 = \frac{(R_1 * R_3 - R_2 * R_t) * I}{R_1 + R_2 + R_3 + R_t} \quad (3)$$

当 $R_1 * R_3 = R_2 * R_t$ 时,则 $V_0 = 0$, 达到电桥平衡。当热辐射面温度发生变化时,铂电阻的阻值 R_t 会发生相应变化,设 $R_t' = R_t + \Delta R_t$, 则此时电桥测量端电压输出为

$$V_0' = \frac{[R_1 * R_3 - R_2 * (R_t + \Delta R_t)] * I}{R_1 + R_2 + R_3 + R_t + \Delta R_t} = \frac{-R_2 * \Delta R_t * I}{R_1 + R_2 + R_3 + R_t + \Delta R_t} \quad (4)$$

可进一步变化为

$$V_0' = \frac{-\Delta R_t}{R_t} * I \quad (5)$$

而在电桥阻值选择中,满足 $\frac{\Delta R_t}{R_2 * R_t} \ll \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_t}$, 所以,有

$$V_0' = \frac{-(R_1 // R_2 // R_3 // R_t) * \Delta R_t}{R_t} * I \quad (6)$$

式中, $(R_1 // R_2 // R_3 // R_t)$ 为桥臂常数,故在电桥参数和恒流源的电流值确定以后,电桥的输出电压与铂电阻的阻值变化率成线性关系。在本文中, $R_1 = R_2 = R_3 = 100 \Omega$, R_t 选择 Pt100 铂电阻,电流源输出为 2 mA, 由铂电阻的温度阻值特性及式(6)可计算出,当温度变化 1 °C 时,电桥电压变化约为 0.1955 mV,放大电路的增益 $A = 16$,AD 采集的精度为 16 bit,设采样值变化 ΔS ,则由式(7)可计算出, $\Delta S \approx 82$,即理论上的温度检测精度为 $1/82 \approx 0.0122 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

$$\frac{\Delta S}{2^{16}} = \frac{V_0' * A}{V_{\text{ref}}} \quad (7)$$

在实际中,还可通过提高电桥系统、放大增益及恒流输出值来进一步提高检测精度,但是考虑到电桥电阻热效应的影响,恒流源电流输出值不能太大,采用 Pt100 铂热电阻时,电流一般小于 2.5 mA。

4 软件设计

4.1 软件控制流程

控制软件的功能是从上位机接收温差参数等指令,实时采集环境温度和热辐射面温度,并以一定的频率计算出所需的控制量,控制 PWM 发生单元产生相应的控制序列。其流程如图 5 所示。

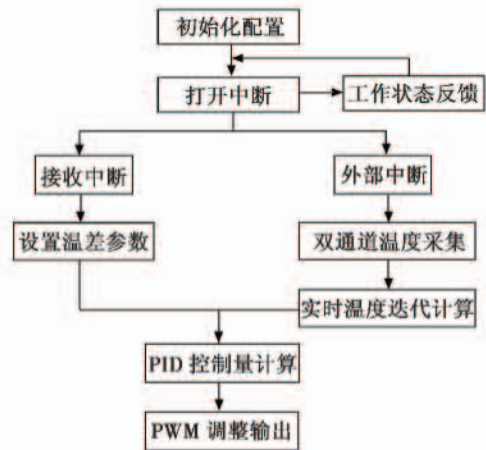


图 5 软件控制流程图

Fig. 5 Flow chart of control software

程序启动后,首先配置好 RS-232 串口、PWM 模块等功能,设置好 AD 采集芯片的工作参数,然后打开串口接收中断及外部中断功能,同时,不断将当前的温度状态通过串口发送给上位机。外部中断是用来监控 AD7705 芯片的状态输出引脚的,一旦有 AD 数据准备好,AD7705 的 DRDY 端将输出低电平,引发控制器一个外部中断,读取 AD 数据。在本设计中,AD 采集频率为 20 Hz,为了让实时控制效果更好,将外部中断优先级设为最高。在外部中断服务程序中,还负责解算真实温度值和 PID 控制量,最终将控制 PWM 的输出频率和占空比。因此,PID 控制的调节频率也为 20 Hz,经大量实验,对比调节时间和控制精度,对于该温控系统,采用此控制频率效果最好。串口接收中断用来接收用户设置的参数,该参数作为 PID 的控制期望值参与计算。

4.2 牛顿迭代算法的实现

采用本文的硬件电路可精确采集到铂电阻的电压,进而可以得到其当前阻值,然而由于铂电阻本身的非线性及使用环境等因素,由电阻值还原出精度达 0.01 °C 以内的温度值并非易事。对于低精度要求的可以采用线性化以后的国际函数分度表,对于精度高的场合,可以采用反向分度函数的方法求,然而精度要求越高,拟合多项式的次数也越高,计算步骤越多,计算量也越大。牛顿迭代算法可以根据预先设定的初值来获得所需的温度求取精度,而且该算法很容易采用计算机语言编程实现,处理速度很快,因此,为了适应温度转换精度及控制器计算速度的要求,本文采用牛顿迭代算法来精确计算温度值。

铂电阻的分度表函数为^[8]

$$R_t = R_{0\text{℃}} * (1 + A * t + B * t^2 + C * t^3 + D * t^4 + E * t^5) \quad (8)$$

令

$$P(t) = R_t - R_{0\text{℃}} * (1 + A * t + B * t^2 + C * t^3 + D * t^4 + E * t^5) \quad (9)$$

则牛顿迭代算式为

$$t_{n+1} = t_n + \frac{P(t_n)}{\frac{dP(t_n)}{dt}} = t_n -$$

$$\frac{R - R_{0\text{℃}} * (1 + A * t_n + B * t_n^2 + C * t_n^3 + D * t_n^4 + E * t_n^5)}{R_{0\text{℃}} * (A + 2 * B * t_n + 3 * C * t_n^2 + 4 * D * t_n^3 + 5 * E * t_n^4)} \quad (10)$$

合适地选取 t_n 的初始值将可有效减少迭代运算的次数,可将式(8)线性化,从而求得 t_n 的初始值,即

$$t_0 = \frac{R(t) - R_{0\text{℃}}}{A * R_{0\text{℃}}} \quad (11)$$

根据此公式,将相应的数值做好单位处理后,设 16 bit AD 采样的数据为 t_n ,则迭代初值为

$$t_0 = (AD_DATA/163.99604) - 255.75251 \quad (12)$$

迭代运算流程如图 6 所示。

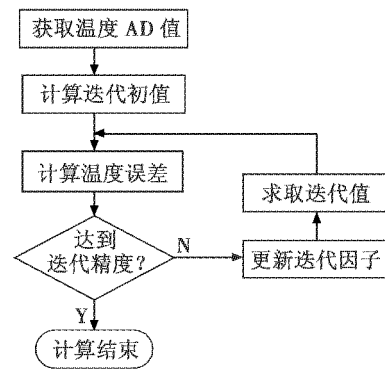


图 6 温度迭代计算流程图

Fig. 6 Flow chart of temperature computation

对于本文所需的 0.01 °C 的精度,分度表函数保留二次方就足以达到精度要求,一般迭代 1~2 次就可完成计算。采用时钟为 22 MHz 的 ARM7 处理器,经测试得出平均每次计算时间为 7.6 ms,在每次采集中要进行两次迭代计算,其计算速度也能满足 20 Hz 的控制频率需求。

5 结论

要实现红外黑体辐射源的高精度要求,关键是温度传感器参量的高精度探测及采集数值与实际温度值的准确转化;其次,良好的黑体结构设计也保证了电热能转换的效率和稳定性。本文采用小型化热辐射源结构设计、高精度恒流源电桥测温电路、牛顿迭代算法等技术方案研制了小型高精度的红外黑体辐射装置,经中南国家计量测试中心的测试,其技术指标如下:1) 温控精度为 ±0.05 °C;2) 差分温度范围为 -12 ~ 15 °C;3) 温度响应时间 ΔT = 2 °C;23 s @ 25 °C;4) 短时稳定性小于 ±0.036 °C @ 10 min;5) 温度均匀性为 0.038 °C @ ΔT < 3 °C;6) 辐射面发射率为 97%;7) 辐射面直径为 30 mm;8) 环境温度为 -15 ~ 25 °C;9) 外形尺寸为 70 mm × 70 mm × 90 mm;10) 供电电源为电压 12.0 V,电流小于 2.5 A。

各项指标均达到设计要求,该成果已申请国家专利,目前应用于红外热像仪的便携式检测系统。

参考文献

- [1] 于胜云,钱婧,雍朝良,等. 红外辐射源标温控及性能测试方法[J]. 红外与激光工程,2011,40(2):199-200.
- [2] ZHANG Lei, ZHENG Xiaobing, ZHANG Liming, et al. High accuracy water bath blackbody based oil the infor-

- mation quantification of infrared remote sensing[J]. Optical Technique, 2007, 33(2):245-248.
- [3] SUI Zuoning, WEI Jianqiang, LI Jingfeng. Extended area blackbodies[J]. Measurement & Test Technically Communion, 2008, 13(2):313-315.
- [4] GU Jingliang, ZHANG Hai, ZHANG Ping. Study on the object simulation targets system with IR imaging[J]. Measurement & Control Technology, 2004, 23(11):16-18.
- [5] HU Tieli, LI Xudong, FU Jianming, et al. Double-blackbody unit for measuring parameters of infrared cameras[J]. Applied Optical, 2006, 27(3):246-248.
- [6] LI Yingjie, LÜ Xiangyin, WU Xiaodi, et al. Calculations of infrared radiation of space target using finite difference method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2):218-219.
- [7] WANG Lei, HU Yafei, YANG Zhu. Research on temperature distortion phenomenon caused by connection of platinum heatresistance[J]. Coal Engineering, 2005, 11(9):68-69.
- [8] YANG Yongzhu. Linear compensation for platinum resistance thermometers with high accuracy and its realization in intelligent instruments[J]. Meter Technology and Sensor, 2000, 10(6):44-46.

(上接第 26 页)

- network services[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3):6714-6720.
- [14] GU Q W, CHEN G, ZHU L L. Short-term marginal price forecasting based on genetic algorithm and radial basis function neural network[J]. Power System Technology, 2006, 30(7):18-21.
- [15] AMJADY N. Day-ahead price forecasting of electricity markets by a new fuzzy neural network[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2006, 21(2):887-896.

(上接第 62 页)

素有关,接近理想的情况下,待测偏振片的消偏比指标能够达到 10^{-3} 量级。同时发现,外界环境对测试结果影响很大,为此,在实验中搭建了暗室环境以降低干扰。

5 结语

针对目前偏振导航传感器的广泛应用,及其标定装置不完善的现状,提出了一种标定系统的整体设计方案,重点介绍了偏振光源、滤光片等部件的选择,并完成了系统搭建。为提高交互性能,在 VC++ 6.0 环境下,开发了标定系统的积分球控制和转台控制程序,实际操作表明,所设计的系统装置能够在实验室环境下实现天空自然光偏振模式的模拟,对偏振光消偏比参数的测试方案可行,测试结果能够满足标定需求。

参考文献

- [1] ROSSEL S, WEHNER R. Polarization vision in bees[J]. Nature, 1986(323):128-131.
- [2] DESBIENS A L. Walking like an insect: A complex system design[Z]. Science Fair, 2001.
- [3] 褚金奎,赵开春. 仿昆虫复眼偏振敏感测角光电模型研究[J]. 纳米器件与技术, 2005(12):541-545.
- [4] 褚金奎,赵开春,王体昌,等. 仿生偏振导航传感器实验模型的构建与标定[J]. 微纳电子技术, 2007(8):376-378.
- [5] 杨姜伟,张旭东,高隽,等. 一种利用偏振光的组合导航移动系统设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8):102-105.
- [6] 袁兴起,陈延如,赵琦,等. 多粒子的侧向散射光偏振性质分析[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(s2):1097-1098.
- [7] 孙晓兵,洪津,乔延利. 大气散射辐射偏振特性测量研究[J]. 量子电子学报, 2005, 22(1):111-115.
- [8] 闫丽荣,高爱华,刘卫国. 高消光比多偏振态光源系统设计[J]. 应用光学, 2012, 33(4):660-665.
- [9] 戴书麟. 偏振光源系统: 中国, CN02249788. 9 [P]. 2002-11-22.
- [10] 国家技术监督局. GB/T 14077-93 双折射晶体和偏振器件测试规范[S]. 北京:国家技术监督局, 1993.