

高精度红外辐射源温控系统硬件设计

李侍林¹, 王莹莹², 杜世凯³, 冯隆兴³, 宋春辉²

(1. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041; 2. 北京振兴计量测试研究所, 北京 100074;
3. 中国人民解放军 93735 部队, 天津 301700)

摘要: 随着红外成像技术的发展及其在探测领域应用的不断创新, 对设备使用的面源黑体的有效辐射面积、控温精确性、辐射均匀性、调变温速率等方面均提出了较高的使用要求; 为了优化提升红外辐射源的关键技术指标, 一种基于帕尔贴效应的红外辐射源得到有效应用, 围绕该红外辐射源配套使用的温控系统中的温度采集精度以及模拟电路搭建的恒压驱动等关键设计过程进行主要介绍, 实验室环境下利用选取的有效辐射面积为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的红外辐射源进行温度精确性、辐射稳定性、变温速率等指标进行测试, 测试结果表明红外辐射源的均匀性可达到 $(0.05 + 0.02 | \Delta t |) ^\circ\text{C}$, 升温速率为 $8\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, 降温速率为 $2\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, 升温 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 并稳定时间为 8 min , 能够实现预期使用要求。

关键词: 红外辐射源; 温度采集; 恒压驱动; 关键性能参数验证

Hardware Design of Temperature—control System for High—accuracy Infrared Radiation Source

Li Shilin¹, Wang Yingying², Du Shikai³, Feng Longxing³, Song Chunhui²

(1. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., LTD., Beijing 100041, China;
2. Beijing Zhenxing Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100074, China;
3. 93735 Unit of the PLA, Tianjin 301700, China)

Abstract: With the continuous innovation of the development technology of infrared imaging detection equipment, strict requirements were put forward for the effective radiation area, stability, uniformity, heating rate and cooling rate of the black body. In order to further improve the key technical parameters of the infrared radiation source, a surface type infrared radiation source based on the Peltier effect was developed. In this paper, the key design processes of the temperature control system which regulated the infrared radiation source were introduced in detail. It included the key design of high—precision temperature acquisition and constant voltage drive of semiconductor devices. Secondly, in the laboratory environment, infrared radiation source with the effective radiation area of $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ was tested particularly. The results showed that the uniformity of the infrared radiation source could reach $(0.05 + 0.02 | \Delta t |) ^\circ\text{C}$, the heating rate was $8\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, the cooling rate was $2\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, the stabilization time was five minutes when Temperature rose five degrees, which achieves the expected goal.

Keywords: plane black body; temperature acquisition; constant voltage drive; verification of key performance parameters

0 引言

随着光电技术的发展, 光学设备的应用领域越来越广, 在军事领域覆盖精确制导、侦察探测、目标预警等, 这些系统是利用可见光、红外等波段对运动目标实施探测、捕获与瞄准跟踪的光电一体化设备, 其性能优劣决定了系统的总体战术技术指标。当前, 对于光电设备尤其是对红外成像设备进行性能评估与测试的要求越来越高, 测试需求覆盖光学设备生产单位的制造、试验, 和用户单位的验收与维护。对于红外成像测试设备来说, 红外辐射源的作用尤为重要, 辐射源相当于红外成像设备的溯源标准, 所以红外辐射源的精度直接决定红外成像探测设备的精度水平。当前, 高精度红外辐射源的国内市场主要由国外进口产品占据, 这些进口产品的关键技术指标包括温度采集的分辨

率可达 $0.001\text{ }^\circ\text{C}$, 辐射均匀性在 $0.05\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, 调温速率满足在 8 min 以内达到温度提升 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 并能够保持稳定, 这些指标在一般的红外成像测试设备应用中能够满足使用需要。与水平较高的进口产品相比, 国内研制与生产的红外辐射源在性能指标上仍处于劣势, 因此本文在红外辐射源的实际应用与特性指标研究的基础上, 设计并实验验证了一种温度控制硬件系统, 能够有效提高现有红外辐射源的温度控制精度, 进而提高红外成像测试设备的精度水平。

1 系统结构与原理

本文介绍的红外温度控制系统针对的是基于帕尔贴效应的红外辐射源, 这种红外辐射源主要依靠器件的帕尔贴效应来实现辐射源的升温与降温效果。温度控制系统工作原理如图 1 所示, 系统为测温传感器提供恒定电流输入来保障传感器的高精度要求, 电路通过温度传感器中热敏电阻阻值的变化进行分压, 将采集的温度变化体现到电信号电压幅值的升降上来; 再对电信号进行滤波与放大处理, 用以去除信号中的高频干扰噪声和工频干扰噪声并将有效

收稿日期: 2020-06-02; 修回日期: 2020-06-16。

作者简介: 李侍林(1988-), 男, 黑龙江人, 硕士, 工程师, 主要从事复杂装备的测试性与光电系统测试性等方向的研究。

信号放大提高信噪比；控制芯片电路根据温度信号的幅值解算出温度信息与系统设定的目标温度通过作差的方式进行比较，根据比较结果进行负向的反馈调节，得出两路输出信号，分别为加热信号和制冷信号；加热信号和制冷信号需要通过驱动电路才能实现辐射源的温度控制，该驱动电路根据两路输入信号的幅值将开关电源输出电压进行比例放大，通过电源输出控制红外辐射温度。温度控制电路在升温信号与降温信号达到动态平衡时将温度控制在设定的目标温度范围内。

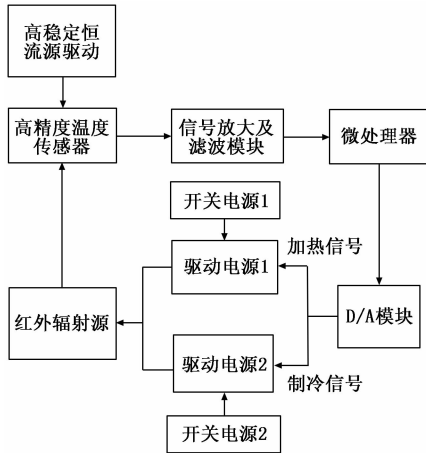


图 1 红外辐射源温控系统工作原理

2 温度控制系统硬件电路设计

红外辐射源温度控制系统的硬件电路为降低分布参数的影响，在设计时尽可能减少使用分立器件。从功能角度划分，温控电路主要包括恒流源电路、信号滤波与放大电路和辐射源驱动电路。

2.1 高稳定恒流源驱动

辐射源的辐射出射度遵循斯蒂芬波尔兹曼定律，即辐射出射度与辐射源温度的 4 次方成正比，可以看出辐射源温度的微小变化也会对其辐射出射度产生较大影响，因此在红外成像测试设备中应用红外辐射源的关键在于对辐射源温度的精确控制。

常见的利用恒压源测电阻—单臂电桥电路时，参考电压与标准电阻的误差均不能被忽略，他们将直接影响到测量值。另外，不平衡电桥的非线性特性也会给最终的温度测量带来了很大的误差。因此设计的高精度测温电路需采用恒流源驱动。

采用恒流源测电阻时能够利用串联电路中电流一致的原理，能够有效地解决铂电阻以及不平衡电桥存在的非线性误差，提升温度测量值的准确性。常见的恒流源包括晶体管恒流源、三端稳压芯片恒流源和集成运放恒流源。晶体管与三端稳压芯片恒流源的温漂较大，不适用于对稳定性有很高要求的使用场合。通过集成运放搭建的恒流源主要利用运算放大器的虚短、虚断原理进行设计，设计使用时需要考虑电路的驱动能力，当需要输出的电流较大时，运放的选择与电路搭建尤为关键，搭建的集成运放恒流源

如图 2 所示。

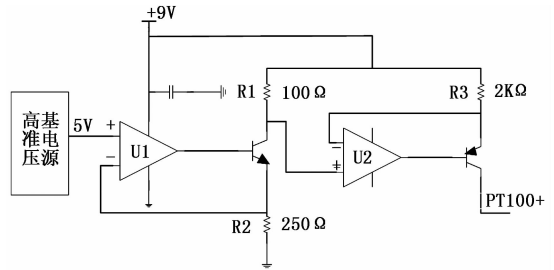


图 2 恒流源驱动设计

U1 与 T1，U2 与 T2 组成两组标准恒流源电路，这样可以消除输入电压的漂移从而减少电路的恒流漂移。电路中 U2 能够为 T2 的发射级提供稳定的电压，因此发射极电压保持不变，不受负载变化的影响处在理想的工作状态。

为保证晶体管电流稳定，输出晶体管需要选取输出电阻较大的晶体管，输出电阻越大越能降低负载变化对恒流的影响；输入级需要提供高精度恒压源，本电路选用精度高、功耗低、噪声低的基准电压源 ADR4550，其最大初始误差为 $\pm 0.02\%$ ，温漂系数为 2 ppm/K，具有良好的温度稳定性和较低的输出噪声。

2.2 放大、滤波、模数转换电路设计

针对放大与滤波电路的设计分别从两方面进行考虑：

1) 控温电路最小可分辨能力与控温准确度相比要过一个数量级以上。按照系统要求控温准确度为 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ ，因此电路的温度分辨率至少为 $0.001\text{ }^\circ\text{C}$ 。当 PT100 温度变化 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 时，热敏电阻的阻值大约变化 $0.39\text{ }\Omega$ ，因此本电路对电压的分辨能力最少为 $0.39\text{ }\mu\text{V}$ 。

2) 通常高精度 ADC 的模数转化量程为 5 V，为保证温控系统的通用性，在 $0\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内 PT100 的电阻阻值变化范围为 $119.40\sim 280.98\text{ }\Omega$ ，转换为电压信号后相应的输出电压值变化范围为 $0.11940\sim 0.28098\text{ V}$ ，需要将较小幅值的电压信号通过运算放大器组成的运算放大电路进行放大处理，按 PT100 两端输出电压与模数转换器的转换量程上限的关系进行估算，放大倍数约为 $5\text{ V}/0.28098\text{ V}\approx 18$ 。

针对采集信号的特点与数据采集电路的要求，需要使用精密仪表专用放大器电路对温控电路恒流源驱动的 PT100 进行前置放大，为保证较好的共模抑制比电路放大器选用 ADA4522 芯片，其电路如图 3 所示。

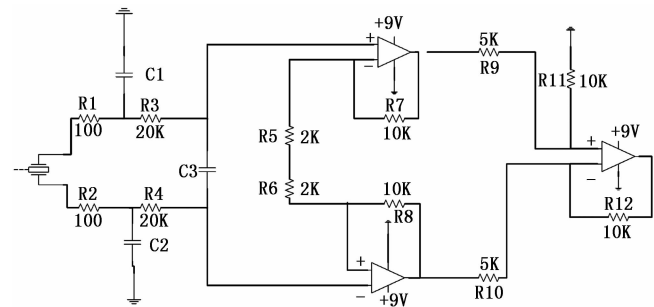


图 3 放大、滤波电路图

模数转换芯片选择 32 位的 AD7177，该芯片电压采集

量程上限为 5 V, 32 位模数转换器可以分别的最小电压为 $0.001\ 16\ \mu\text{V}$, 分辨率满足使用需求, $5\ \mu\text{V}$ 的超低输入失调电压以及 $22\ \text{nV}/^\circ\text{C}$ 输入失调电压漂移, 当环境温度在 $20\ ^\circ\text{C}$ 基础上变化 $70\ ^\circ\text{C}$ 范围内, 根据均方根噪声^[3] 分析: $\sqrt{(0.022 \times 70)^2 + 0.005^2} = 0.35\ \mu\text{V}$, 小于 $0.359\ \mu\text{V}/0.001\ ^\circ\text{C}$ 的电压变化量, 所以使用环境温度在 $-50\sim 90\ ^\circ\text{C}$ 间, 均不影响滤波与放大电路的使用精度。

2.3 温控系统硬件电路测温准确度验证

将温度控制系统硬件电路中测温功能部分电路进行实验室计量检定, 在实验室环境下, 每间隔 $10\ ^\circ\text{C}$ 选取一个校准点, 在 $5\sim 80\ ^\circ\text{C}$ 内进行取样, 根据温度传感器 PT100 分度表, 将精密电阻箱阻值设置为校准温度所对应的标准电阻值, 通过线缆连接在测温电路上, 观察并记录测温电路采集并显示的温度值, 测量温度值与设定温度值的差值即为误差, 测量数据如表 1 可知, 在 $5\sim 80\ ^\circ\text{C}$ 的温度内, 测温电路的采样值误差均在 $0.03\ ^\circ\text{C}$ 以内。

表 1 测温准确度测量数据

温度/ $^\circ\text{C}$	标准电阻/ Ω	显示温度值/ $^\circ\text{C}$	误差/ $^\circ\text{C}$
0	100	0	0.000
10	103.902	10.000	0.000
20	107.791	19.980	0.020
30	111.675	29.970	0.030
40	115.542	39.970	0.030
50	119.396	49.980	0.020
60	123.242	59.970	0.030
70	127.074	69.970	0.030
80	130.898	79.980	0.020
90	134.706	90.000	0.000
100	138.503	100.010	0.010
110	142.291	109.980	0.020
120	146.064	120.000	0.000

3 电压驱动电路设计

红外辐射源的温度变化取决于对其半导体器件所施加的工作电压的幅值大小及电压方向, 通过电压方向的变换实现红外辐射源的加热与制冷的变换, 实现温度控制的效果。红外辐射源可达到的温度变化范围为 $5\sim 80\ ^\circ\text{C}$, 这就需要驱动器件提供较大的驱动功率。恒流驱动方式较难实现电流方向切换, 且电源效率低、发热现象严重, 因此本电路设计采取一种半导体电压驱动方式。电压驱动电路将输入电压范围为 $0\sim 10\ \text{V}$ 的模拟信号转换成占空比为 $0\%\sim 100\%$ 的 PWM 信号进行输出, 转换得到的 PWM 信号通过 BTN8962TA 芯片进行功率放大, 经放大后的信号输出电流可达 $20\ \text{A}$, 能承受的最大输入电源电压为 $35\ \text{V}$, 具有很强的驱动能力。BTN8962TA 芯片对电路的两路输入信号均进行功率放大提高驱动能力, 放大后的输出电压直接并联在红外辐射源的两端, 由此实现改变电流方向的效果。

由于温度控制系统采用开关电源的直流输出电压为 BTN8962TA 芯片提供电源供电, 基于帕尔贴效应的红外辐

射源在常温下交流电组极小, 约为 $0.1\ \Omega$, 因此上电瞬间会存在较大的输入浪涌电流, 长期受浪涌电流影响会降低芯片的可靠性。为避免浪涌电流的影响本电路在输入端增加一个可复位的保险丝, 保险丝内阻 $7.5\ \Omega$ 可有效抗击浪涌电流的冲击; 为防止漏电流的影响, 电路再通过瞬态抑制二极管的正向导通、反向击穿特性起到双重保护的作用。

4 实验结果与分析

将设计的温度控制硬件电路与辐射源和相应软件控制算法搭配进行红外辐射源温度控制验证实验, 本文将与模糊 PID 控制算法相结合, 对辐射源进行温度控制并对其进行性能参数的测试。使用的辐射源主要由辐射板、半导体帕尔贴器件、散热片、四线制 PT100 温度传感器等部分组成。

4.1 升温并稳定时间测试实验

在实验室环境下, 将被测红外辐射源初始温度设置为 $5\ ^\circ\text{C}$, 待其温度达到稳定后, 设置红外辐射源温度为 $10\ ^\circ\text{C}$ 并同时开始计时, 待温度达到 $10\ ^\circ\text{C}$ 且稳定在浮动范围在 $0.02\ ^\circ\text{C}$ 以内时停止计时, 此时时间 $T_1\text{s}$ 即为升温并稳定时间^[6], 在 $5\sim 80\ ^\circ\text{C}$ 的温度范围内以每隔 $5\ ^\circ\text{C}$ 为间隔选取测试温度点, 实验测试数据如表 2 所示。

表 2 升温并稳定时间实验测试数据

温度/ $^\circ\text{C}$	升温时间/s	稳定时间
10	45	7 min
15	50	6 min 36 s
20	45	5 min 12 s
25	50	4 min 11 s
30	50	4 min 14 s
35	50	4 min 32 s
40	48	4 min 26 s
45	45	4 min
50	40	3 min 52 s
60	40	3 min 33 s
65	45	5 min
70	50	5 min 11 s
75	50	5 min 08 s
80	40	5 min

由实验数据可知, 每升高 $5\ ^\circ\text{C}$ 并稳定时间在 $8\ \text{min}$ 以内。

4.2 温场精确度测试实验

在实验室环境中, 首先记录环境温度, 并将红外辐射源温度分别设定为 $5\ ^\circ\text{C}$ 、 $10\ ^\circ\text{C}$ 、 $20\ ^\circ\text{C}$ 、 $30\ ^\circ\text{C}$ 、 $40\ ^\circ\text{C}$ 、 $50\ ^\circ\text{C}$ 、 $60\ ^\circ\text{C}$ 、 $70\ ^\circ\text{C}$ 、 $80\ ^\circ\text{C}$ 共 9 个温度点, 逐个温度点进行观测红外辐射源实测温度是否在设定的温度范围 $\pm 0.02\ ^\circ\text{C}$ 内变化。然后将红外热像仪的光学系统调至无穷远的状态, 对红外辐射源 80% 有效辐射面积内 3×3 个温度点进行均匀扫描, 记录红外热像仪的各组测量值。依据进行运算处理, 计算出各测量点温度值与平均值的最大差值即为温度精度最终测试结果, 测试数据如表 3 所示, 由实验数据可知, 在 $5\sim$

(下转第 186 页)