

DOI:10.16136/j.joel.2023.10.0557

一种新型的双模式红外传感器热电元件温度测量方法

陈 镔*

(武夷学院 农机智能控制与制造技术重点实验室,福建 武夷山 354300)

摘要:传统的红外温度测量传感器由热电元件和热敏电阻两种传感器构成,其中热电元件用于测量待测物体的目标温度,热敏电阻用于测量环境温度。本论文提出了一种新型的温度测量方法,通过使用单一的热电元件及其AD(analog-digital)模块和PMOS(positive channel metal oxide semiconductor)电路实现双模式的切换,在一个测量周期内实现红外传感器测温和环境温度补偿的作用。采用TSMC(Taiwan Semiconductor Manufacturing Company)0.35 μm CMOS(complementary metal oxide semiconductor)工艺制造红外传感器,对红外传感器进行温度校准后按照双模式切换方法进行测试和实验,经过温度补偿后温度测量平均误差小于0.01 $^{\circ}\text{C}$,极大地提高了测量精度和环境温度补偿精度,减小动态温度测量误差,同时简化了红外温度传感器的设计制造过程,具有很好的实用价值。

关键词:温度测量;双模式切换;红外传感器;温度补偿

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2023)10-1068-07

A new dual-mode infrared sensor thermo-electric element temperature measurement method

CHEN Bin*

(Key Laboratory of Agriculture and Machinery Intelligent Control and Manufacturing Technology, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300, China)

Abstract: Conventional infrared temperature measurement sensors consist of two types of sensors: a thermo-electric element for measuring the target temperature of the object to be measured and a thermistor for measuring the ambient temperature. This paper proposes a novel temperature measurement method that enables dual-mode switching by using a single thermo-electric element and its analog-digital (AD) module and positive channel metal oxide semiconductor (PMOS) circuit to achieve infrared sensor temperature measurement and ambient temperature compensation in one measurement cycle. The TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) 0.35 μm complementary metal oxide semiconductor (CMOS) process is used to manufacture the infrared sensor, and test and experiment are conducted according to the dual-mode switching method after the temperature calibration of the infrared sensor is completed. The average error of temperature measurement is less than 0.01 $^{\circ}\text{C}$ after temperature compensation, which greatly improves the measurement accuracy and ambient temperature compensation accuracy, reduces the dynamic temperature measurement error, and simplifies the design and manufacturing process of the infrared temperature sensor. It has a very good practical value.

Key words: temperature measurement; dual-mode switching; infrared sensors; temperature compensation

* E-mail: 17013780@qq.com

收稿日期:2022-08-24 修订日期:2022-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目(61903288)、福建省自然科学基金项目(2022J011191)、福建省科技厅引导性科研项目(2021H0061)、南平市资源化学产业研究项目(N2020Z003)、福建省教育厅科技项目(JAT210457)和武夷学院服务产业研究专项(2021XJFWCY02)资助项目

0 引 言

随着微机电和电路技术的快速发展,许多微传感器和微执行器逐渐演化为微机电产品。红外传感器就是一种被广泛应用于消费产品和工业的传感器^[1,2]。

由于红外传感器不用和待测物直接接触即可测量温度,属于一种非接触型的热辐射传感器,测量相当方便且快速。传统的热辐射温度计一般由两个部分所组成,一个是热电元件(又称为热电堆)用于测量目标温度,另一个则是热敏电阻用于测量环境温度^[3]。在传感器芯片设计的时候热敏电阻需要布局在热电元件的周围,其所测量的环境温度不是热电元件本身的环境温度,而是热电元件周围的环境温度,因此它所测量到的环境温度不够精确,导致在测量过程中经过温度补偿的实际测量目标温度不够准确。再者,红外传感器芯片设计过程中除了需要同时布局热电元件与热敏电阻外,还要另外布局和设计热敏电阻及其连接导线,从而获得热敏电阻的信号,如此便会增加红外传感器芯片的整体布局面积和芯片制造成本。

为解决上述问题,本文提出了一种新型的温度测量方法,通过使用单一的热电元件及其 AD (analog-digital) 模块和 PMOS (positive channel metal oxide semiconductor) 电路实现双模式的切换,在一个测量周期内实现红外传感器测温和环境温度补偿的作用,从而大幅度提高测量精度,同时在红外传感器芯片设计和布局过程中有效缩小芯片面积和降低芯片制造成本,具有很好的实用价值和广阔的应用前景。

1 双模式热电元件测温原理

1.1 红外传感器测温原理

红外传感器测温原理主要可以分为基于光电效应的光子型传感器和基于热效应的热型传感器。而一般的热型红外传感器根据设计原理可以细分为热电式和热阻式。本文所设计的传感器为热型红外传感器,传感器内部包含热电元件以及热敏电阻,热电元件利用某些材料或者元件根据温度的变化特性来进行温度测量。热敏电阻则是一种电阻随着温度改变而产生变化的元件^[4]。

红外测温传感器主要是利用红外线的热辐射,常用的传统方法是将一个红外传感器用于测量入射在此传感器上热电元件的热辐射量,以及红外传感器上的另一个元件热敏电阻用于测量环境温度。热

辐射温度测量示意图如图 1 所示。

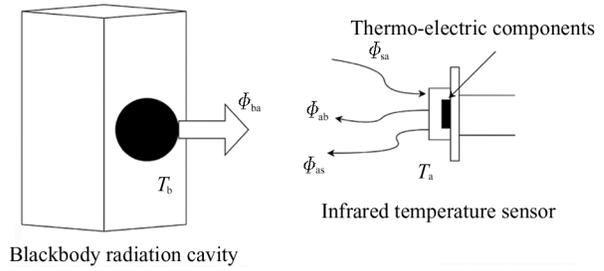


图 1 热辐射温度测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal radiation temperature measurement

图 1 中, Φ_{ba} 为黑体辐射腔对红外传感器的热辐射, Φ_{ab} 为红外传感器对黑体辐射腔的热辐射, Φ_{sa} 为环境对红外传感器的热辐射, Φ_{as} 为红外传感器对环境的热辐射。假设此时红外传感器与环境温度为热平衡,即 $\Phi_{as} \approx \Phi_{sa}$, 则红外传感器的净辐射量 $\Delta\Phi$ 可以表示为式(1):

$$\Delta\Phi = \Phi_{ba} + \Phi_{sa} - \Phi_{ab} - \Phi_{as} \quad (1)$$

根据斯蒂芬-波尔兹曼定律可以得到热辐射交换方程^[5],如式(2)~(5)所示:

$$\Phi_{ba} = A_{ba}\epsilon_b\sigma T_b^4 \quad (2)$$

$$\Phi_{sa} = A_{sa}\epsilon_a\sigma T_a^4 \quad (3)$$

$$\Phi_{ab} = A_{ab}\epsilon_a\sigma T_a^4 \quad (4)$$

$$\Phi_{as} = A_{as}\epsilon_a\sigma T_a^4 \quad (5)$$

式中, A 表示几何因子,它描述了从目标到传感器的光学路径中各种元素的光学因子, ϵ 代表不同材料的热辐射发射率, T_b 表示黑体辐射腔的温度, T_a 表示红外传感器的温度。

由式(2)~(5)可以推导得到式(1),即红外传感器的净辐射吸收。再根据热传方程式(6),即可获得待测目标的温度 T ^[6]。

$$H \frac{dT}{dt} + G(T - T_a) = \Delta\Phi \quad (6)$$

式中, H 是红外传感器热电元件的比热容, G 是热传导系数, T 是目标测量温度。

红外传感器的光学因子包括红外传感器对目标的视野、滤波器的光学特性,以及传感器的尺寸等。视野被描述为从目标到传感器的立体角,滤波器的光学特性意味着红外线辐射的透射光谱,而传感器的大小将决定接收的红外线功率^[7,8]。由于材料表面的发射率 ϵ 是其发射和接收热辐射能量的效率,特别是对于目标和传感器。因此,目标和传感器材料的发射率也是影响红外传感器温度测量灵敏度的主要因素之一^[9,10]。

1.2 红外传感器热电元件结构设计

根据红外传感器热电元件热辐射测温原理设计红外传感器芯片,采用标准的 TSMC(Taiwan Semiconductor manufacturing Company) 0.35 μm 的 CMOS(complementary metal oxide semiconductor) 工艺来制造热电元件。图 2 所示为红外传感器热电元件设计结构图。热电元件的结构是中心对称的,由 32 对串联的热电偶组成,在芯片的中心是感温区,周围布满热电偶,每对热电偶会使用不同材料,分别是 n+ Poly 和 -Metal1。根据热电效应,当热辐射进入中心的感温区时,具有两种不同材料的串联热电偶将在冷端和热端之间产生微弱的电压差,多对热电偶串联后可以提高电压差值^[11]。

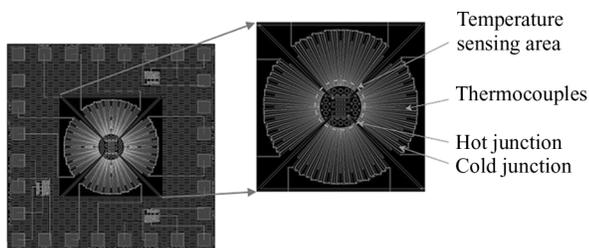


图 2 红外传感器热电元件设计结构图

Fig. 2 Diagram of infrared sensor thermo-electric element design structure

1.3 红外传感器热电元件温度补偿

在实际温度测量时需要特别注意环境温度变化

对测量的影响,而温度补偿就用于补偿温度变化引起的影 响。在红外传感器温度测量中,当传感器用于工业环境中设备的安全监控时,特别是用于测量设备的热辐射时,由于其材料特性,这种传感器的测量结果通常容易受环境温度的影响^[12,13]。因此,需要通过温度补偿以提高温度测量的精确度和实用性。在环境温度为动态变化的条件下,环境的热辐射将从物体反射出来而进入红外传感器,这会导致红外温度传感器读取错误的误差温度。因此,为了解决这些热源的影响,一般的红外传感器旁会额外设置一个热敏电阻作为监控测量组件与环境的温度,将待测目标周围环境的热辐射考虑在内,以提高红外传感器的测量温度的准确性^[14,15]。

1.4 红外传感器热电元件双模式切换原理

与传统的红外传感器测温架构不同,本文提出了一种新的红外传感器温度测量方法,此方法是基于双模式切换电路应用于单个热电元件的红外传感器。通常,红外传感器的热电元件用于测量待测目标温度,因此它本身的材料对温度敏感,同样也可以作为环境补偿的热敏电阻。在实际应用中,由红外传感器辐射引起的传感器本身温度升高不足 0.1 °C,因此热电元件本身也可以用于监测环境温度,从而用于温度补偿。为了实现红外传感器热电元件的双模式切换,在信号放大器的前端设置一个 PMOS 管,通过 ARM(advanced RISC machines)控制器控制 PMOS 的通断,如图 3 所示。

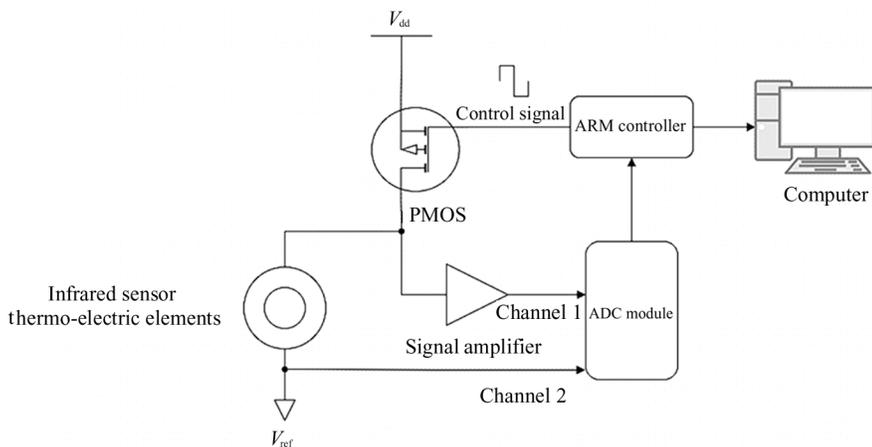


图 3 红外传感器热电元件测量电路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the measurement circuit of the infrared sensor thermo-electric element

上述电路具有两种模式:第一模式为热电元件测量温度模式;第二模式为等效热敏电阻测量环境温度模式。当 PMOS 截止时,参考电压 V_{ref} 信号通过红外传感器热电元进入信号放大器,经过信号放大后输入到 ADC (analog to digital signal conversion)模块第一通道,再通

过 ARM 控制器串口传输给计算机,此时模式为第一模式即热电元件测量温度模式。当 PMOS 导通时,红外传感器热电元件可以等效为热敏电阻,电压信号 V_{dd} 经过红外传感器热电元件直接进入 ADC 模块第二通道,最后经 ARM 控制器处理后将数据传送给计算机,此时模

式为第二模式,即等效热敏电阻测量环境温度模式。

1.5 红外传感器热电元件双模式切换软件设计

本文使用 ARM Cortex-M3 作为主控制器,通过主控制器的 GPIO(general-purpose input/output)输出不同电位信号,选择 ADC 通道读取信号,接着通过 GPIO 口输出周期性的方波序列控制 PMOS 管的导通与截止,完成红外传感器热电元件的双模式切换。在两种模式下都需要采集信号并通过 ADC 模块转换后传输给主控制器,主控制器对数据信号进行预处理后通过串口传输给计算机或上位机进行数据保存与分析。红外传感器热电元件双模式切换软件设计流程图如图 4 所示。

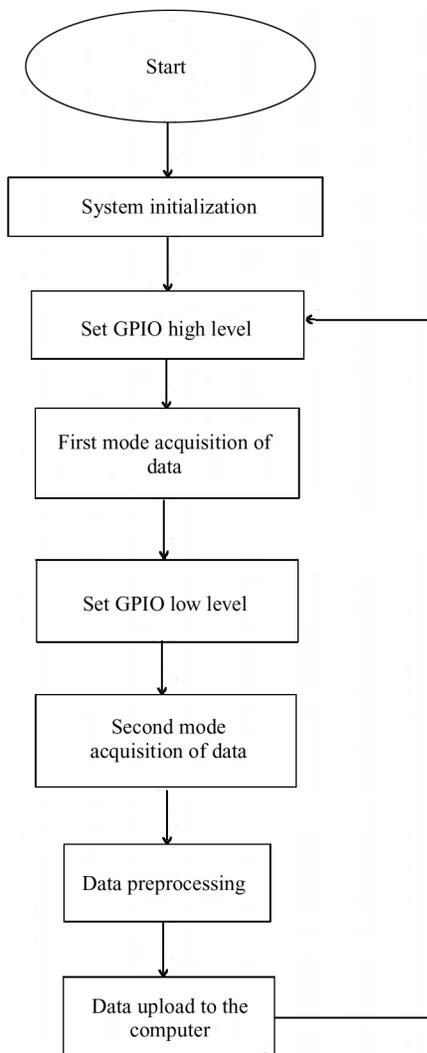


图 4 红外传感器热电元件双模式切换软件设计流程图

Fig. 4 Flow chart of infrared sensor thermo-electric element dual-mode switching software design

2 实验与分析

2.1 红外传感器热电元件芯片试制

本文采用 TSMC0.35 μm CMOS 工艺进行试制,成功获得红外传感器芯片,之后对红外传感器芯片进行 TO5 金属封装,如图 5 所示。金属封装能够提高热辐射红外传感器的稳定性和精度。

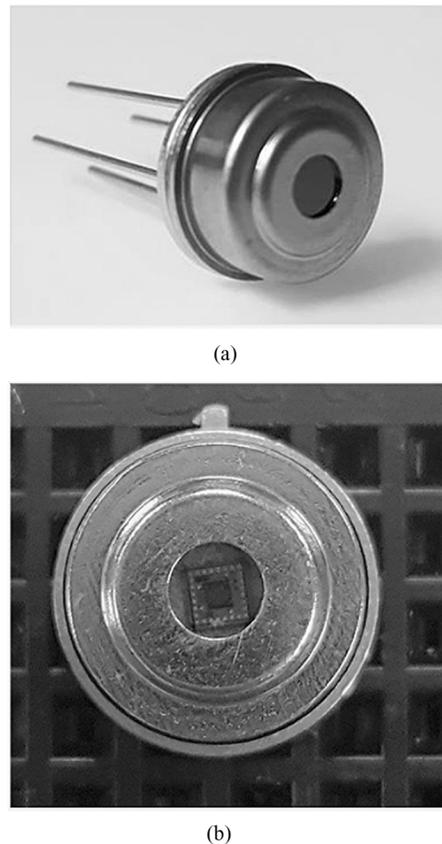


图 5 红外传感器芯片 TO5 金属封装图:
(a) 含滤镜; (b) 不含滤镜

Fig. 5 Diagram of infrared sensor chip TO5 metal package:
(a) With filter; (b) Without filter

2.2 红外传感器热电元件系统测试电路板及结构图

为了验证红外传感器热电元件双模式测量方法的可行性和有效性,制作了有 TO5 封装的红外传感器热电元件双模式切换电路板,如图 6 所示。

该电路板包含 TO5 封装的红外传感器热电元件芯片、用于双模式切换的 PMOS 管、稳压电源模块、信号放大芯片 AD8551、ADC 模块以及串口通信芯片。

在实际实验过程中,需要分别对第一模式和第二模式进行温度测量与校准,并使用校准后的第二

模式对红外传感器热电元件进行温度补偿,实际的测试系统结构图如图7所示。

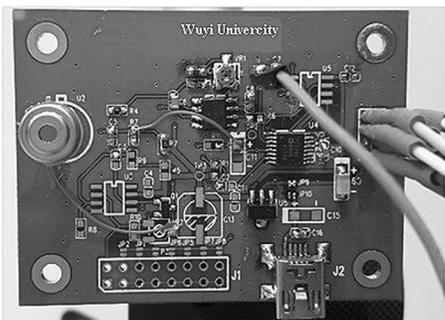


图6 红外传感器热电元件双模式切换电路板
Fig. 6 Infrared sensor thermo-electric element dual-mode switching board

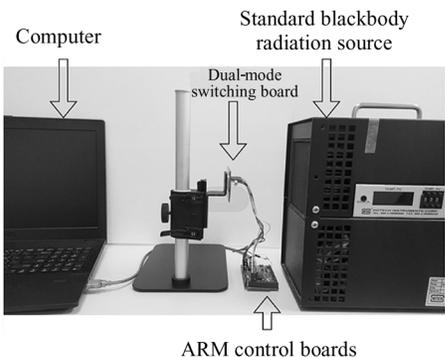


图7 红外传感器热电元件双模式切换测试结构图
Fig. 7 Diagram of infrared sensor thermo-electric element dual-mode switching test structure

2.3 红外传感器热电元件温度测量系统校准及测试

在双模式切换的工作条件下,需要对第一模式和第二模式进行温度校准,最后通过第二模式对环境温度进行补偿并计算系统测量误差。

实验中,热电元件的温度测量范围控制在30—80℃,每间隔10℃测量热电元件的电压信号(第一模式),同时也记录了等效热敏电阻模式下的电压信号以进行后续温度补偿(第二模式)。根据双模式切换下电压信号分别绘出第一模式电压信号与目标温度 T_b 的关系图以及第二模式电压信号与目标温度 T_b 的关系图,如图8、图9所示。从图8中可知,热电元件输出电压随着目标温度的升高而升高,对于目标温度变化,其灵敏度约为0.5 mV/℃,再利用曲线拟合,可得到热电元件的电压温度转换方程。

在相同的目标温度下,红外传感器热电元件读取电压可能有所不同,因此推导出来的目标温度会有所偏差,所以需要不同热电红外传感器电压进行温度校正和环境温度补偿。首先进行环境温度的

变化量 ΔT_a 与热电元件输出电压的变化量 ΔV_b 的测量。在进行红外传感器热电元件校正时,调整标准黑体的温度从30—80℃变化,并在稳定的环境下测量热电组件输出电压,同时记录了等效热敏电阻以用于补偿环境温差,目的是保证标准黑体和红外传感器热电元件之间的热辐射交换。然后通过图10的曲线进行温度补偿,而温度补偿后的校正曲线如图11所示。

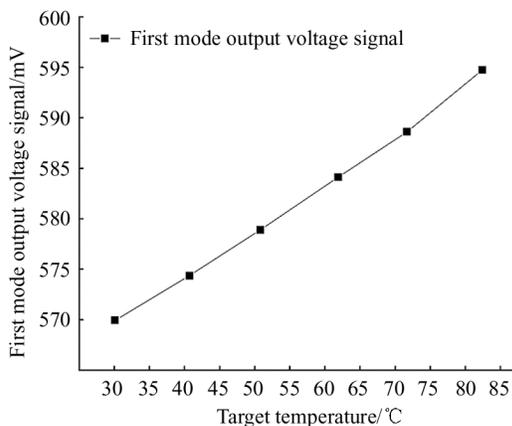


图8 目标温度与第一模式输出电压信号关系图
Fig. 8 Relationship between target temperature and first mode output voltage signal

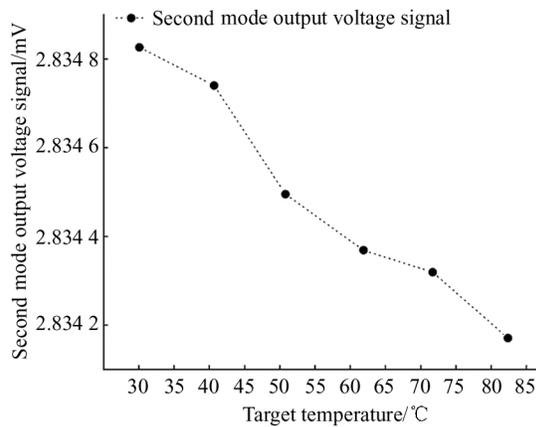


图9 目标温度与第二模式输出电压信号关系图
Fig. 9 Relationship between target temperature and second mode output voltage signal

红外传感器热电元件输出电压与目标温度之间的关系为4阶多项式,符合史蒂夫-玻尔兹曼定律,从曲线中可以计算出最大误差在0.004℃,此误差来源为环境温度补偿的不稳定性,在30—80℃的测量范围内,经过温度补偿后,红外传感器热电元件的测量误差为±0.01℃,测试系统具有很高的测量精度,有很好的实用价值。

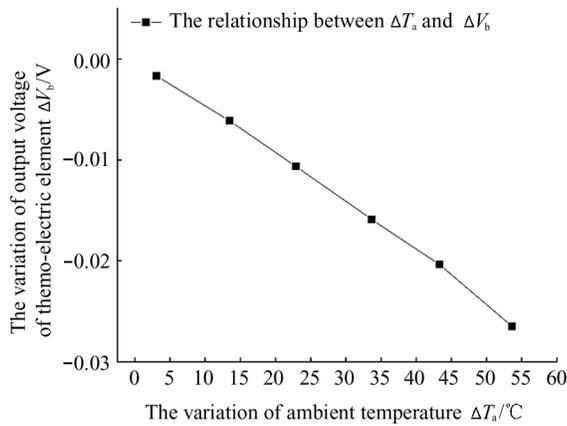


图 10 环境温度的变化量 ΔT_a 与热电元件输出电压的变化量 ΔV_b 的关系图

Fig. 10 The relationship between the variation of ambient temperature ΔT_a and the variation of output voltage of thermo-electric element ΔV_b

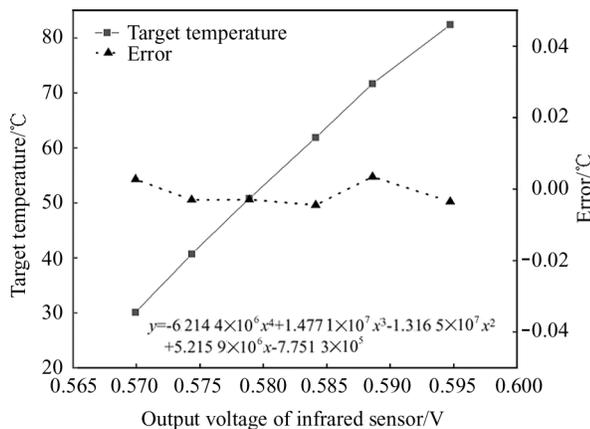


图 11 温度补偿下红外传感器热电元件目标温度、误差与输出电压的关系

Fig. 11 Relationship between target temperature, error and output voltage of infrared sensor thermo-element under temperature compensation

3 结 论

本文提出一种新型热电元件双模式切换的温度测量方法,与传统的红外传感器相比,这是一种基于双模切换的单个红外传感器热电元件的测量方法,该热电元件兼有红外传感器和环境温度传感器的作用。利用双模式切换电路在检测目标温度和环境温度补偿之间进行双模式切换。经过温度校准后,传感器的温度测量误差在 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,该实验结果和理论分析具有良好的一致性。该方法极大地提高了测量精度和环境温度补偿精度,减小动态温度测量误差,同时简化了红外温度传感器的设计制造过程,减小了传感器制造成本,具有很好的实用价值。

参考文献:

- [1] HOU H G. Design and key technologies research on CMOS-MEMS thermopile infrared detector [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020: 1-20.
侯海港. CMOS-MEMS 热电堆红外探测器设计及关键技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020: 1-20.
- [2] LI Y, LEI Z Y, LI Q S. Application and development of infrared detection technology[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(2): 80-83.
李意, 雷志勇, 李青松. 红外探测技术的应用与发展[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(2): 80-83.
- [3] WU X Z, LEI C, GUAN Y H, et al. Circular thermopile infrared detector structure optimization and simulation analysis[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(13): 17-22.
武学占, 雷程, 关一浩, 等. 圆形热电堆红外探测器的结构优化与仿真分析[J]. 电子测量技术, 2021, 44(13): 17-22.
- [4] CHEN H Y, CHEN A, CHEN C. Investigation of the impact of infrared sensors on core body temperature monitoring by comparing measurement sites[J]. Sensors, 2020, 20(10): 2885.
- [5] BITYKOV V K, KHUDAK Y I, GUSEIN-ZADE N G. Analytical derivation of the Stefan-Boltzmann law for integral radiance from Planck's law for spectral radiance[J]. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2018, 45(2): 46-50.
- [6] LARWA B. Heat transfer model to predict temperature distribution in the ground[J]. Energies, 2018, 12(1): 25.
- [7] MA Y, DONG B, LEE C. Progress of infrared guided-wave nanophotonic sensors and devices [J]. Nano Convergence, 2020, 7(1): 1-34.
- [8] HUANG X T, ZHANG C B, CONG L, et al. Investigation of wide-angle thin metamaterial absorber at infrared region [J]. Optoelectronics Letters, 2021, 17(11): 669-672.
- [9] CAO L, HOU Y, ZHANG L. Design and simulation of bias-selectable few photon dual-colour photodetector operating in visible and near-infrared regions[J]. Optoelectronics Letters, 2020, 16(5): 333-337.
- [10] XIE K H, ZHANG X, ZHANG X W, et al. A slot microring sensor with feedback spiral waveguide for trace gas CH₄ sensing in mid-infrared region [J]. Optoelectronics Letters, 2019, 15(1): 1-5.
- [11] UCHIDA K I, ADACHI H, KIKAWA T, et al. Thermoelectric generation based on spin Seebeck effects [J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104.10: 1946-1973.
- [12] WU Y J, XU W, YANG F, et al. Temperature sensing system based on fiber laser intracavity modulation [J]. Jour-

nal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(5): 460-467.

吴亚杰, 徐伟, 杨帆, 等. 基于光纤激光器内腔调制的温度传感系统[J]. 光电子·激光, 2020, 31(5): 460-467.

- [13] CAI L J, ZHOU K L, SHEN G Z, et al. High-precision temperature measurement and calibration technology of infrared thermal imager[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(10): 20210043.

蔡李靖, 周凯来, 沈桂竹, 等. 红外热像仪高精度测温标定技术[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(10): 20210043.

- [14] YANG J Y, LIANG L, TANG H M, et al. High sensitivity two-directional FBG inclination sensor with temperature compensation[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(4): 351-356.

杨建宇, 梁磊, 唐浩冕, 等. 一种温度自补偿的高灵敏

度 FBG 双向倾角传感器[J]. 光电子·激光, 2020, 31(4): 351-356.

- [15] YANG Q Z, WANG Y X, XU H. Design of portable infrared thermometer and temperature compensation technology [J]. Infrared Technology, 2021, 43(6): 597-606.

杨清志, 王玉香, 徐宏. 便携式红外体温计设计与温度补偿技术研究[J]. 红外技术, 2021, 43(6): 597-606.

作者简介:

陈 镔 (1984—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事微机电传感器设计与智能系统方面的研究.