

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407870

# 高温防护热板法导热仪的新一代电子系统设计

张 领 徐保峥 李艳宁

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072)

**摘要:**针对高温防护热板法导热仪的电子系统进行了深入研究,发现该电子系统的温度测量数据波动范围大、测量周期长以及加热功率计算不准确,这些问题均对仪器的测量重复性产生了不利影响。通过设计高温防护热板法导热仪的新一代电子系统,在新一代电子系统的设计中搭建热电偶温度传感器冷端补偿恒温结构和加热电路取样电阻散热结构,降低了温度测量数据的波动范围,提高了加热功率计算的准确性,并利用两片温度转换芯片重新构建温度测量电路,提升了温度测量的转换频率。实验结果表明,电子系统改进后的高温防护热板法导热仪在 200 °C ~ 600 °C 的温度范围内测量重复性从改进前的 $\pm 3.67\% \sim 8.93\%$ 提升到 $\pm 2.69\% \sim 4.34\%$ 。新一代电子系统使得仪器的测量重复性显著提升,能够为保温材料在高温下的测量提供更为可靠的数据支持,在实际应用中具有重要价值,有望推动高温保温材料研究的深入发展。

**关键词:** 防护热板法; 导热系数; 电子系统; 测量重复性; 高温

**中图分类号:** TP216 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## New generation electronic system design of high-temperature guarded hot plate thermal conductivity apparatus

Zhang Ling Xu Baozheng Li Yanning

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** An extensive investigation was conducted on the electronic system of the high-temperature guarded hot plate method thermal conductivity apparatus. It was observed that the electronic system had several issues, including large fluctuation range of temperature measurement data, prolonged measurement cycles, and inaccurate calculation of heating power, all of which negatively impacted the measurement repeatability of the apparatus. By designing a new generation of electronic systems for the high-temperature guarded hot plate method thermal conductivity apparatus, the thermocouple cold junction compensation temperature control structure and the heating circuit sampling resistor heat dissipation structure were constructed in the design of the new generation electronic system, which reduces the fluctuation range of temperature measurement data and improves the accuracy of heating power calculation. Moreover, the temperature measurement circuit was reconstruct by using dual temperature conversion chips to increase the conversion frequency of temperature measurement. The experimental results demonstrate that the measurement repeatability of the high-temperature guarded hot plate method thermal conductivity apparatus, after the electronic system enhancement, has significantly improved from  $\pm 3.67\% \sim 8.93\%$  to  $\pm 2.69\% \sim 4.34\%$  within the temperature range of 200 °C ~ 600 °C. The new generation of electronic systems has markedly enhanced the measurement reliability of the apparatus, providing more reliable data support for the measurement of insulation materials at high temperatures. It is of great value in practical applications and is expected to promote the in-depth development of research on high-temperature insulation materials.

**Keywords:** guarded hot plate method; thermal conductivity; electronic system; measurement repeatability; high temperature

## 0 引言

保温材料在高温下的可靠导热系数是评判其能否用于高温热设计的重要依据,受到了多领域的关注<sup>[1]</sup>。比如,在钢铁冶炼、火力发电等高温工业,需要高温保温材料来减少热量损失,提高能源利用效率。或是航天飞行器再入大气层时的气动加热,需要高温保温材料来阻隔高温,保护飞行器的结构部件和内部设备。而在使用保温材料进行高温热设计前,都需要在高温条件下测量其可靠的导热系数作为理论依据<sup>[2]</sup>。防护热板法是测量保温材料导热系数的仲裁法,其使用的防护装置尽可能消除了被测试件边缘的热损失,保证了一维传热的稳定性<sup>[3]</sup>。针对保温材料在不同温度的工作需求,防护热板法导热仪产生了两种设计形式,两者均基于防护热板法在室温下的测量原理,并假设该原理同样适用于高温<sup>[4]</sup>。课题组依据国际标准 ISO8302<sup>[5]</sup> 和国家标准 GB/T10294<sup>[6]</sup> 开发的高温防护热板法导热仪在 200 °C ~ 600 °C 的温度范围内进行实验时,测量重复性为 ±3.67% ~ 8.93%,无法满足保温材料在高温下导热系数可靠测量的需求。

因此,本文系统分析了高温防护热板法导热仪测量重复性差的原因,主要为仪器现有的电子系统所致。首先,电子系统采用热电偶温度传感器测量仪器内部的温度,但未对热电偶温度传感器进行冷端补偿,使其测量的温度数据波动范围大。其次,电子系统对仪器内部温度的测量周期长,温度无法及时更新,使得与其真实温度存在偏差。最后,电子系统通过加热电路的电流较大,导致加热电路中关键器件温度升高性能改变,影响仪器加热功率的计算。

为此,本文设计了高温防护热板法导热仪的新一代电子系统,旨在解决仪器现有电子系统存在的问题,提高仪器的测量重复性,从而使仪器具备在更多行业应用的潜力,推动高温保温材料研究的深入发展。比如,聚合物、气凝胶和纤维保温材料在高温条件下的保温性能高于传统保温材料数倍,但目前在高温条件下测量材料导热系数的仪器还存在许多不足,无法测量其在高温条件下的可靠导热系数<sup>[7]</sup>。

## 1 仪器测量原理及结构

防护热板法是为被测试件建立一个稳态传热的温度场<sup>[8]</sup>,其单试件测量原理如图 1 所示。热板与冷板之间存在温差,以在被测试件两侧形成温度梯度。护板是防止热板径向热损失的护圈,温度随热板温度同时变化。背板与热板之间填充保温材料,温度与热板温度相同,隔

绝与热板的热交换。热板提供的热量仅纵向流向被测试件,待温度梯度稳定后,由式(1)计算出被测试件的导热系数。

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot d}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为被测试件的导热系数;  $\Phi$  为热板的加热功率;  $T_1$  为被测试件的热面温度;  $T_2$  为被测试件的冷面温度;  $A$  为被测试件的计量面积;  $d$  为被测试件的厚度。

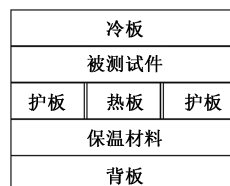


图 1 单试件测量原理

Fig. 1 Single specimen measurement principle

高温防护热板法导热仪必须确保被测试件内部在高温下能形成一维稳态热场。因此,仪器的测试栈体需要满足严格的设计标准,该结构不仅要确保热场的一维性,还直接关系到稳态热场的建立效果<sup>[9]</sup>,是整个仪器的核心部分。仪器的测试栈体结构如图 2 所示。

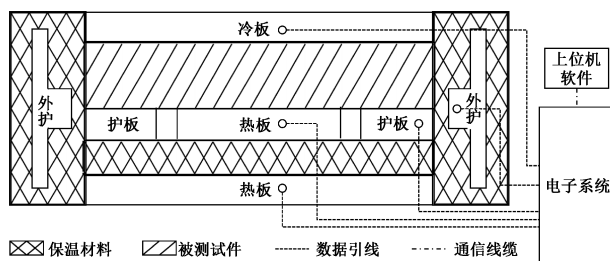


图 2 测试栈体结构

Fig. 2 Test stack structure

被测试件夹在热板与冷板之间,热板提供热量穿过被测试件传递到冷板。测试栈体的结构应尽可能让热板提供的热量仅纵向流向被测试件,所以就需控制被测试件附近的热场分布。为此,测试栈体内各板分别安装有热电偶温度传感器和加热单元,加热单元由嵌入各板的电加热丝构成。但从各板引出电加热丝和热电偶温度传感器的导线会带走部分热量,影响各板的温度分布。所以在测试栈体内设计了外护,温度与热板温度相同,电加热丝和热电偶温度传感器引出的导线经过外护,就会减少其带走的热量。外护的外围填充保温材料,减小与周围环境的热交换,保证测试栈体内部的温度恒定,促进一维稳态热场的建立。

测试栈体内各板的热电偶温度传感器和电加热丝通过数据引线连接至电子系统,实时测量各板温度和控制各板加热功率。电子系统通过通信线缆连接至上位机软

件进行数据上传,并接收上位机软件下发的控制信号。

## 2 新一代电子系统设计

### 2.1 电子系统总体设计

高温防护热板法导热仪的新一代电子系统总体设计框图如图3所示,主要包括微控制单元(microcontroller unit, MCU)主控电路、温度测量电路、功率控制及测量电路、半导体制冷电路、数据通信电路和稳压供电电路。MCU主控电路接收上位机软件下发的指令,控制温度测量电路、功率控制及测量电路,将测量的数据传给上位机软件。温度测量电路测量测试栈体内各板的温度,并将温度测量电路板与热电偶温度传感器的冷端数据采集板放在恒温结构中,确保温度测量的稳定性。功率控制及测量电路向加热电路输入加热电压并测量,同样将加热电路中的取样电阻放在散热结构中,保证加热功率计算的准确性。半导体制冷电路控制半导体制冷片使冷端补偿恒温结构和取样电阻散热结构达到设定温度。数据通信电路将MCU主控电路的串口信号转换成通用串行总线(universal serial bus, USB)信号,通过USB线与上位机软件进行通信。稳压供电电路采用不同参数的稳压电源对上述电路进行稳定供电。

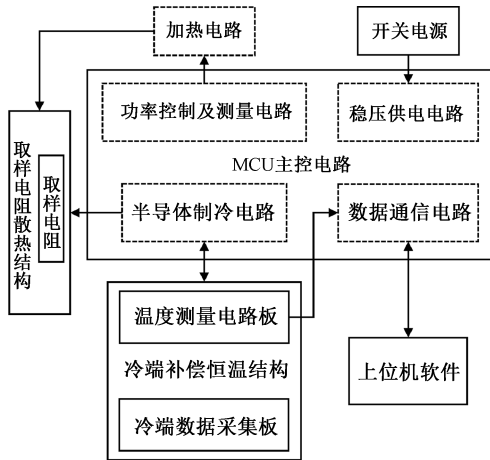


图3 电子系统总体设计框图

Fig. 3 Electronic system overall block diagram

上述各部分电路共同构成了高温防护热板法导热仪的新一代电子系统。仪器启动后新一代电子系统的各部分电路开始供电,上位机软件下发开始测量的指令。MCU主控电路接收上位机软件输入的实验温度值,然后将温度测量电路测量测试栈体内各板的实际温度值传至上位机软件。上位机软件根据实际温度值与实验温度值,通过比例积分微分(proportional integral derivative, PID)温度控制算法计算加热电压的输出值。由功率控

制及测量电路将加热电压输出到加热电路,控制测试栈体内各板的温度。待测试栈体内达到稳定状态后,即可通过式(1)计算出被测试件的导热系数。

### 2.2 温度测量电路设计

温度测量电路是新一代电子系统的关键部分,测试栈体内各板温度测量的准确与否直接决定了仪器能否形成稳定的一维热场<sup>[10]</sup>。温度测量电路采用热电偶温度传感器测量测试栈体内各板的温度。在实际应用中,为了确保温度测量结果的准确性,通常需要对热电偶温度传感器进行冷端补偿,修正由冷端温度波动而引入的误差。恒温迁移补偿法作为热电偶温度传感器冷端补偿方法的其中一种,满足本文对热电偶温度传感器冷端补偿的要求。恒温迁移补偿法的核心思想在于将热电偶温度传感器的冷端置于相对稳定的环境中,减少冷端温度波动对测量结果的影响,再依据热电偶的中间温度定律,将热电势迁移至0℃,实现温度的精确测量。根据热电偶的中间温度定律,其输出热电势满足式(2)。

$$E(T, 0) = E(T, T_0) + E(T_0, 0) \quad (2)$$

式中:  $E(T, 0)$  为冷端温度为0℃时的输出热电势;  $E(T, T_0)$  为冷端温度为 $T_0$ 时的实测热电势;  $E(T_0, 0)$  为冷端温度从 $T_0 \sim 0$ ℃之间的补偿热电势。

热电偶温度传感器的冷端处于在相对稳定的环境中,  $T_0$  和  $E(T_0, 0)$  均为已知常数。通过将  $E(T_0, 0)$  与实际测量的热电势  $E(T, T_0)$  相加,获得补偿后的热电势  $E(T, 0)$ 。依据标准分度表,再将  $E(T, 0)$  转换为对应的温度值,即可得到准确的热端温度  $T$ 。

为此,本文搭建了热电偶温度传感器冷端补偿恒温结构,将热电偶温度传感器的冷端保持在相对稳定的环境中,结构如图4所示。冷端数据板和温度测量板通过排针排母连接进行数据传输,两者均采用铜制螺柱与紫铜柱固定,并与紫铜柱间留有空隙,用于背面过孔。紫铜柱的导热系数较大,能快速将冷端数据板和温度测量板在运行过程中产生的热量传出去。紫铜柱外是胶木套,在紫铜柱和胶木套间填充保温材料,隔绝外部环境的干扰,确保内部温度稳定。胶木套外是铝制外壳,铝制外壳底面与半导体制冷片的冷面紧密贴合,通过半导体制冷片制冷时的冷面温度降低铝制外壳的温度。半导体制冷片的热面配有散热片和散热风扇进行散热,将半导体制冷片制冷时热面产生的热量快速散发到周围环境中,保证冷面的制冷效果。冷端补偿恒温结构经过持续的热交换后,其内部逐步趋向稳定状态。在稳态下,热电偶温度传感器的冷端数据板与温度测量板处于相对稳定的环境中<sup>[11]</sup>,从而保证温度测量电路采用热电偶温度传感器测量测试栈体内各板温度数据的稳定性。

温度测量电路基于LTC2983芯片进行设计,其外围电路如图5所示。LTC2983芯片具有0.1℃的测量精度

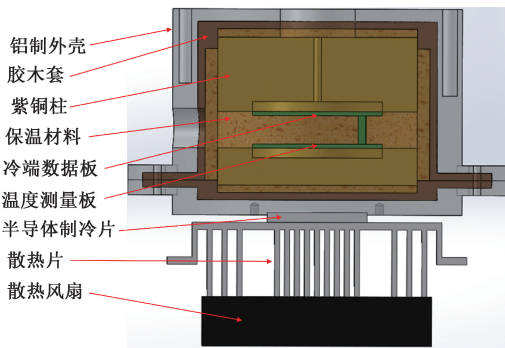


图 4 冷端补偿恒温结构

Fig. 4 Cold end compensation thermostat structure

和 0.001 °C 的分辨率,能够实现自动补偿冷节点温度以及对测量结果的线性化调节。

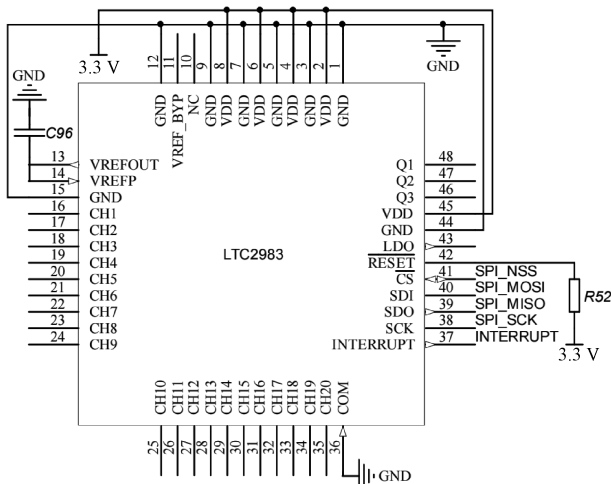


图 5 LTC2983 外围电路

Fig. 5 LTC2983 peripheral circuit

LTC2983 芯片的 CS 引脚、SDI 引脚、SDO 引脚和 SCK 引脚作为串行外设接口 (serial peripheral interface, SPI) 通信协议的组成部分连接至 MCU 芯片。当 LTC2983 芯片处于启动或执行温度转换的期间时,INTERRUPT 引脚输出低电平,反之则输出高电平。MCU 芯片可以根据 LTC2983 芯片的 INTERRUPT 引脚输出的高低电平,判断 LTC2983 芯片对温度的转换是否完成,能否读取温度测量结果。LTC2983 芯片的 RESET 引脚为复位引脚,连接至 3.3 V;VREFOUT 引脚为基准电压输出引脚,连接至正基准输入引脚 VREFP;LDO 引脚、Q1 引脚、Q2 引脚和 Q3 引脚、VREF\_BYP 引脚为内部电源引脚;VDD 为连接至 3.3 V 的模拟电源输入引脚。LTC2983 芯片的 CH1 引脚至 CH20 引脚为模拟输入引脚;COM 引脚为所有单端配置中的公共负端输入引脚连接至 GND。

LTC2983 芯片内部集成了 3 个高精度、低噪声和低漂移的 24 位缓冲式模数转换器 (analog digital converter, ADC),对 LTC2983 芯片的操作分为启动、通道分配、启动转换、转换和读取结果 5 个步骤<sup>[12]</sup>,操作流程如图 6 所示。LTC2983 芯片上电初始化后进入通道分配状态,测试栈体内各板的热电偶温度传感器数据分别在五路通道上进行配置,配置完成后开始温度转换。但 LTC2983 芯片内部只有 3 个 ADC,最多同时转换三路温度,剩下的两路温度只能等待下个转换周期进行温度转换。而为了在上位机软件中同时显示测试栈体内各板的温度,就需在上位机软件中多延时一个温度转换周期的时间,此时显示的各板温度不再是其真实温度。后续上位机软件对测试栈体内各板 PID 温度控制算法的计算也会不准确,从而影响测试栈体内各板的温度控制。为此,在新一代电子系统的温度测量电路中,通过 MCU 芯片驱动两片 LTC2983 芯片同时转换五路温度,减少上位机软件更新测试栈体内各板温度的等待时间。但 MCU 芯片与第 2 片 LTC2983 芯片通信的 PA15 引脚与其下载电路中的 JTAG 引脚共用,配置错误会导致第 2 片 LTC2983 芯片无法使用。所以需将 PA15 引脚配置为普通输入/输出 (input/output, I/O) 引脚,然后开启 AFIO 时钟,关闭 JTAG 功能,启用 SWD 功能。这样设置既不影响 MCU 芯片的程序下载和调试,也能使第 2 片 LTC2983 芯片正常工作。

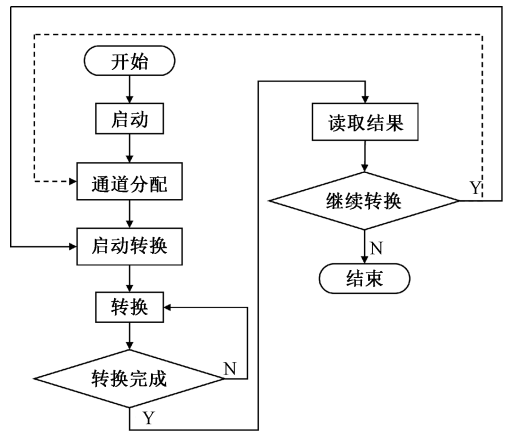


图 6 LTC2983 操作流程

Fig. 6 LTC2983 operation procedure

### 2.3 功率控制及测量电路设计

功率控制电路包括电压输出电路和加热电路。而高温防护热板法导热仪原有电子系统的电压输出电路最小输出电压为 2.4 mV,电压输出精度较低,影响测试栈体内各板的温度控制。为此,新一代电子系统选用 16 bits 同步 8 通道,最小输出电压为 1.2 mV 的 AD5672R 芯片进行电压输出电路的设计,提升加热电压输出的精确性。

电压输出电路如图7所示。AD5676R芯片各通道的输出电压增益可选择1倍或2倍,若GAIN引脚连接至GND,输出电压为0~2.5V;若GAIN引脚连接至3.3V,输出电压为0~5V。为了得到更快的加热速度,本文将GAIN引脚连接至3.3V。AD5676R芯片的SYNC引脚、SCLK引脚和SDI引脚连接至MCU芯片进行SPI通信;RSTSEL引脚连接至GND,上电后各通道初始输出电压为0;LDAC引脚连接至GND,同步加载数据。AD5676R芯片的RESET引脚为低电平有效的异步复位引脚,连接至3.3V;V<sub>LOGIC</sub>引脚为连接至3.3V的数字电源输入引脚;VDD引脚为连接至5V的模拟电源输入引脚;V<sub>REFOUT</sub>引脚为基准电压输出引脚,通过电容旁路连接至GND;VOUT0~7引脚为模拟输出引脚。加热电路如图8所示,电压输出电路输出的电压经运算放大器LM258DR输入到达林顿管MJ11032的基极上。达林顿管基极电压的大小控制了达林顿管的通断和经过集电极、发射极电流的大小<sup>[13]</sup>。电加热丝 $R_L$ 同达林顿管的集电极在同一回路,从而在输入电压不变时,维持电加热丝中的电流恒定,保证测试栈体内各板的加热功率稳定。

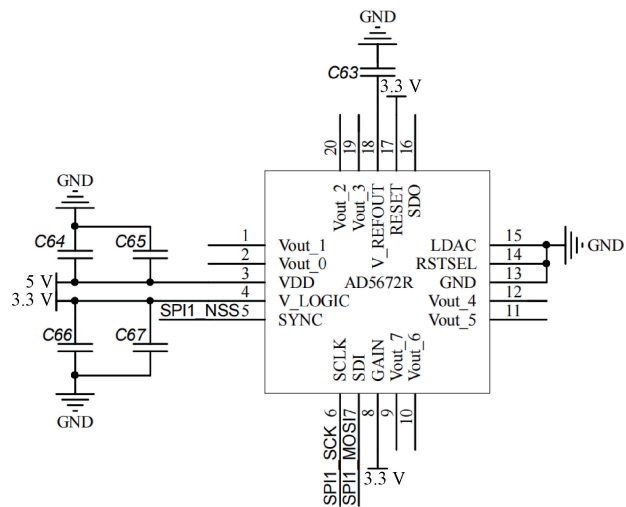


图7 电压输出电路

Fig. 7 Voltage output circuit

在仪器进行实验时,流过电加热丝上的电流通常较大,同样流过取样电阻 $R_0$ 的电流也较大,会使其温度升高产生温漂现象,阻值发生变化<sup>[14]</sup>,影响仪器加热功率计算的准确性。为此,本文设计了取样电阻散热结构如图9所示。取样电阻与紫铜柱间采用铜制螺钉固定,紫铜柱的导热系数较大,能够将取样电阻因承载较大电流而产生的热量快速传出去。紫铜柱外是铝制外壳,一方面将取样电阻产生的热量向外扩散,另一方面隔绝外部环境的干扰,确保内部环境的稳定。紫铜柱的底面与半导体制冷片的冷面紧密贴合,通过半导体制冷片制冷时的冷面温度降低紫铜柱因取样电阻散热而升高的温

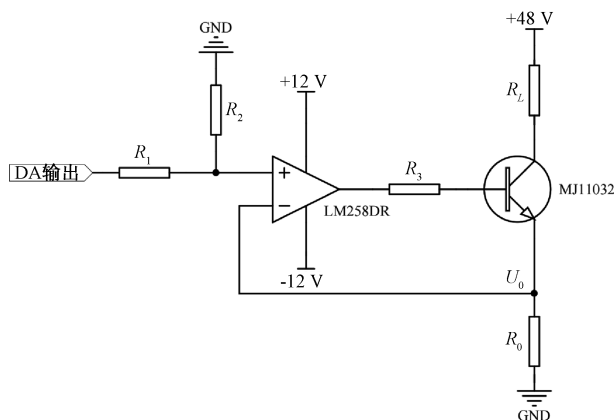


图8 加热电路

Fig. 8 Heating circuit

度。在不断的热交换过程中,取样电阻散热结构的内部逐渐趋近于稳定状态。达到稳态后,取样电阻能够处于相对稳定的环境中,避免因温度波动导致的取样电阻阻值漂移,从而提高加热功率计算的准确性。

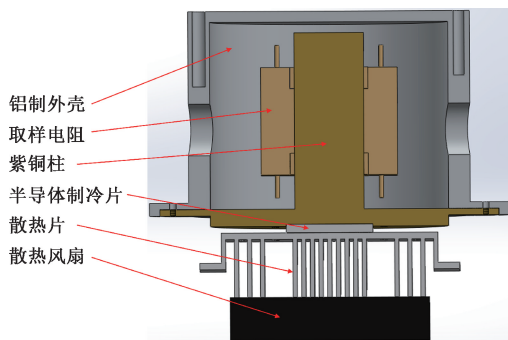


图9 取样电阻散热结构

Fig. 9 Sampling resistor heat dissipation structure

高温防护热板法导热仪的加热功率是由热板电加热丝的阻值和通过电加热丝的电流计算得到。电加热丝的阻值在温度确定时是一个定值,所以只需测得流过热板电加热丝的电流即可。由图8可知,热板的电加热丝 $R_L$ 和达林顿管MJ11032在同一个回路中,而达林顿管发射极的电流和集电极的电流近似相同<sup>[15]</sup>。因此,流过热板电加热丝的电流与流过取样电阻 $R_0$ 的电流相同。可以通过测量取样电阻两端的电压 $U_0$ 计算出流过取样电阻两端的电流。将取样电阻的一端接地,另一端接到功率测量电路获得取样电阻两端的电压。功率测量电路如图10所示,电压采集功能由温度测量电路中的LTC2983芯片实现,其引脚的电压测量范围为-1.25~1.25V。而电压输出电路输出的电压范围为0~5V,经过 $R_1$ 、 $R_2$ 分压后 $U_0$ 的范围约为0~4.55V,还需使用 $R_5$ 、 $R_6$ 对 $U_0$ 进行分压。 $U_0$ 分压后的电压范围约为0~1.14V,在LTC2983芯片引脚的电压测量范围内。

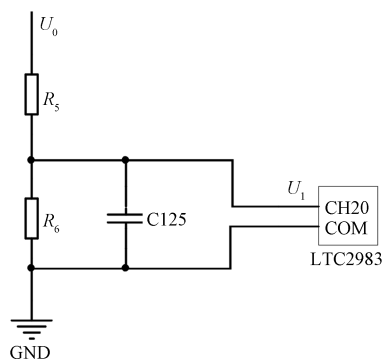


图 10 功率测量电路

Fig. 10 Power measurement circuit

### 2.4 半导体制冷电路设计

温度测量电路中的冷端补偿恒温结构和功率控制电路中的取样电阻散热结构,都需要通过额外的制冷来使其达到设定温度。而半导体制冷片运行可靠、冷却速度快,便于自动控制<sup>[16]</sup>。因此,本文基于半导体制冷片设计了半导体制冷电路,分为半导体制冷控制电路和半导体制冷测量电路。

半导体制冷控制电路如图 11 所示,其中制冷控制电路是对冷端补偿恒温结构进行制冷控制,与对取样电阻散热结构的制冷控制电路相同。制冷控制电路主要是利用继电器来控制半导体制冷片是否进行制冷,由光电耦合器 PS2501 作为继电器的驱动,对信号进行电-光-电的转换<sup>[17]</sup>。实验开始后,半导体制冷测量电路会实时监测冷端补偿恒温结构的温度并传到上位机软件中,当实际温度高于设定温度时,上位机软件会控制 MCU 主控电路输出一个高电平信号,光电耦合器 PS2501 内的发光二极管点亮,光敏三极管处于导通状态,继电器闭合,制冷片两端的电压为 12 V,开始制冷。反之则停止制冷,若冷端补偿恒温结构的温度再次上升,则继续开始制冷。半导体制冷测量电路采用两个温度传感器分别测量冷端补偿恒温结构和取样电阻散热结构的实际温度,并传到上位机软件中对制冷情况进行监控。温度传感器选用 DS18B20,温度直接以数字的方式传输,测量温度范围为 -55 ℃ ~ 125 ℃,支持 3 ~ 5.5 V 的电压范围<sup>[18]</sup>。

外部电源供电是 DS18B20 最佳的工作方式<sup>[19]</sup>,稳定可靠,抗干扰能力强,电路如图 12 所示。DS18B20 的工作电源由 1 引脚接入,连接至 3.3 V,不存在电源电压不足的问题,可以保证测量精度。2 引脚为 I/O 口,连接至 MCU 芯片。3 引脚连接至 GND,不能悬空,否则不能测量温度。在这种外接电源的方式下,可以充分发挥 DS18B20 宽电源电压范围的优点,即使电源电压降到 3 V,依然能保证温度测量的精度。在 MCU 芯片的一个 I/O 口可以连接多个 DS18B20,但要区分这些 DS18B20

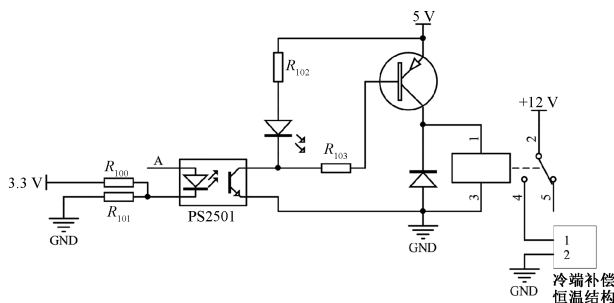


图 11 半导体制冷控制电路

Fig. 11 Thermoelectric refrigeration control circuit

就要先匹配其只读存储器 (read only memory, ROM) 的序列号,再对匹配成功的 DS18B20 进行操作,这无疑会增加程序的复杂性。并且当一个 DS18B20 出现问题需要更换时,由于每个 DS18B20 的 ROM 序列号是唯一的,就必须更改程序,这将增加新一代电子系统的维护难度,因此,本文采用在 MCU 芯片的两个 I/O 口各连接一个 DS18B20 的方法跳过 ROM 序列号匹配。

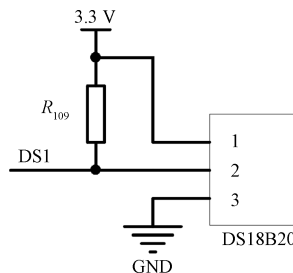


图 12 DS18B20 供电电路

Fig. 12 DS18B20 supply circuit

### 2.5 数据通信电路设计

为了方便新一代电子系统与上位机软件进行数据传输,在不影响串口功能和传输速度的前提下,利用数据通信电路将串口信号转换成 USB 信号,通过 USB 数据线与上位机进行连接。数据通信电路基于 CH340G 芯片进行设计,电路如图 13 所示。

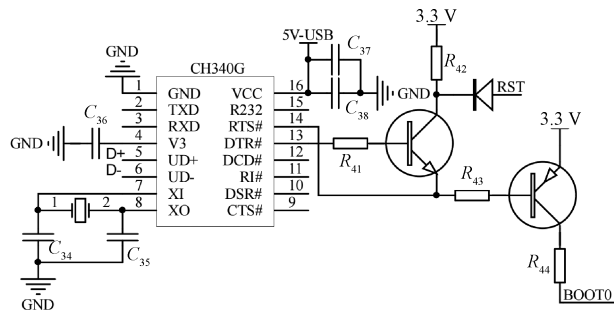


图 13 数据通信电路

Fig. 13 Data communication circuit

CH340G 芯片的 UD+引脚和 UD-引脚采用差分走线的方式与 USB 对应的 D+引脚和 D-引脚相连,以保证信号的传输质量并抑制干扰<sup>[20]</sup>。同时本文在数据通信的基础上还设计了 MCU 芯片的程序下载电路,可在上位机软件直接通过 USB 数据线下载 MCU 芯片程序,不再依赖下载线才能进行程序下载,便于新一代电子系统的维

修调试。

### 2.6 稳压供电电路设计

稳压供电电路为新一代电子系统中各电路分别提供  $\pm 12$  V、5 和 3.3 V 的电压。其中  $\pm 12$  V 的电压由 RQ-125D 型号开关电源进行提供,可靠性强<sup>[21]</sup>,满足新一代电子系统各部分电路对稳定供电的需求。

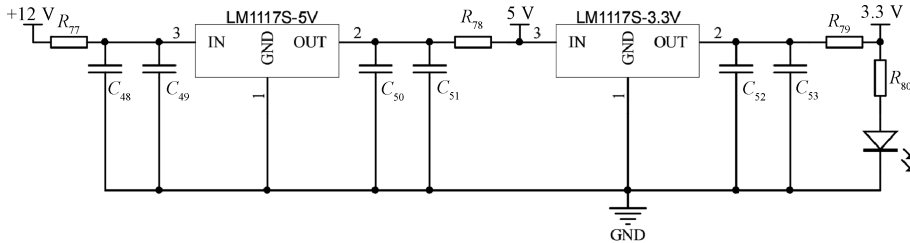


图 14 稳压供电电路

Fig. 14 Regulated power supply circuit

5 V 电压为数据通信电路和功率控制及测量电路供电,3.3 V 电压为 MCU 主控电路和温度测量电路供电,都需要较强的稳定性和较小的噪声。为此,本文基于 LM1117 芯片设计了稳压供电电路如图 14 所示,将 12 V 的电压转换为 5 V 电压,再将 5 V 电压转换为 3.3 V 电压。LM1117 芯片的外围电路极其简单,只有 3 个引脚,在固定电压模式下,GND 引脚接地;在可调模式下,GND 引脚是调节引脚。本文选择固定电压模式,将 GND 引脚直接接地,IN 引脚和 OUT 引脚分别为输入引脚和输出引脚,在输入端和输出端使用电容滤除噪声。

## 3 实验结果与分析

针对新一代电子系统改进后的高温防护热板法导热仪设计了测量重复性评价实验。被测试件选用高温保温材料 SILCAL 1100,这种保温材料具有高温稳定性和宏观尺度上的各向同性<sup>[22]</sup>。在实验前将被测试件放入 850 °C 的干燥箱中 48 h,确保被测试件的质量恒定,减少其他因素对实验结果的影响。

将被测试件放入仪器的测试栈体内,启动仪器的上位机软件开始实验。依次进行实验温度为 200 °C、400 °C、600 °C 的测量实验,每个温度点连续测量 5 组,实验结束后计算每个温度点 5 次导热系数测量结果的重复性。实验结果如表 1 所示。

从表 1 可以得出,新一代电子系统的设计极大提高了高温防护热板法导热仪的测量重复性。当实验温度在 200 °C 时,仪器的测量重复性为  $\pm 2.69\%$ ,而随着温度的升高,仪器的测量重复性有所降低,但在 600 °C 的测量重复性仍能达到  $\pm 4.34\%$ 。

表 1 仪器的测量重复性

Table 1 Measurement reproducibility of the apparatus

实验温度/ °C	导热系数测量值/ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	测量平均值/ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	测量重复性/%
200	0.093 25	0.096 58	2.69
	0.096 50		
	0.095 53		
	0.100 35		
	0.097 28		
	0.111 83		
400	0.110 53	0.115 11	3.47
	0.120 20		
	0.115 40		
	0.117 57		
600	0.151 23	0.146 04	4.34
	0.150 87		
	0.139 23		
	0.149 85		
	0.139 00		

本文研制的高温防护热板法导热仪新一代电子系统,相较于现有先进高温防护热板法导热仪的电子系统,也展现出显著的优势,性能对比结果如表 2 所示。

表 2 电子系统性能对比

Table 2 Comparison of the electronic system performance

研制机构	测量精度	稳定性	成本
中国计量科学研究院	高	中	高
山东非金属材料研究院	中	中	中
德国 NETZSCH 公司	高	高	高
本文	中	高	低

中国计量科学研究院研制的高温防护热板法导热仪,其电子系统的温度测量功能由 6 台测温仪实现,加热功率控制及测量功能由 5 台直流电源、恒功率源、标准电阻和 34420A 数字表实现<sup>[23]</sup>。山东非金属材料研究所研制的高温防护热板法导热仪,其电子系统的温度控制功能由 5 位半可编程仪表与 Pt100 温度传感器实现,加热功率测量功能由 3458A 数字表、标准电阻和直流电源实现<sup>[24]</sup>。上述先进高温防护热板法导热仪的电子系统均采用分立式元件组合方案,这不仅导致电子系统的成本高昂、体积庞大,还使得系统易受到环境因素的干扰,在一定程度上影响仪器的稳定性。

此外,德国 NETZSCH 公司生产的 GHP 456 Titan 型高温防护热板法导热仪使用 29 对经过独立标定的 Pt100 温度传感器<sup>[25]</sup>。虽具备测量精度高、稳定性好的特点,但电子系统复杂、调试繁琐,增加了仪器的制造和维护成本,难以推广应用。而本文设计的新一代电子系统不仅满足高温防护热板法导热仪对温度和加热功率准确测量与控制的需求,还便于调试与维护且生产成本低,具有广阔的应用前景与市场潜力。

## 4 结 论

本文针对高温防护热板法导热仪电子系统所存在的问题进行了深入研究,分析了电子系统影响仪器测量重复性的原因,并设计了仪器的新一代电子系统。实验结果表明,电子系统改进后的高温防护热板法导热仪,其测量重复性显著提升,能够为保温材料在高温下的测量提供更为可靠的数据支持。新一代电子系统使得仪器在实际应用中具有重要价值和推广前景,有望推动高温保温材料研究的深入发展。新一代电子系统虽基本满足对冷端补偿恒温结构和取样电阻散热结构的温度控制要求,但仍需改进半导体制冷电路以及冷端补偿恒温结构和取样电阻散热结构,以进一步提升仪器的性能优势。

## 参考文献

- [ 1 ] ZHANG H, SHANG C Y, TANG G H. Measurement and identification of temperature-dependent thermal conductivity for thermal insulation materials under large temperature difference [ J ]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, 171: 107261.
- [ 2 ] HAY B, HAMEURY J, FLEURENCE N, et al. New facilities for the measurements of high-temperature thermophysical properties at LNE [ J ]. *International Journal of Thermophysics*, 2014, 35(9): 1712-1724.
- [ 3 ] RIZZO G, CHRISTEN R. Calibration methodology for contact heat flux sensors with enhanced accuracy [ J ]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(4): 045003.
- [ 4 ] FLYNN D R, HEALY W M, ZARR R R. High-temperature guarded hot plate apparatus-control of edge heat loss [ J ]. *Thermal Conductivity*, 2005, 28: 208-223.
- [ 5 ] ISO8302-1991, Thermal insulation-determination of steady state thermal resistance and related properties-guarded hot plate apparatus [ S ].
- [ 6 ] GB/T10294-2008, 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定-防护热板法 [ S ].  
GB/T10294-2008, Thermal insulation-determination of steady state thermal resistance and related properties-guarded hot plate apparatus [ S ].
- [ 7 ] WU J, HAMEURY J, FAILLEAU G, et al. Design guideline for new generation of high-temperature guarded hot plate [ J ]. *International Journal of Thermophysics*, 2018, 39: 1-21.
- [ 8 ] TERZIC M M, MILOSEVIC N D, STEPANIC N M, et al. Development of a single-sided guarded hot plate apparatus for thermal conductivity measurements [ J ]. *Thermal Science*, 2016, 20(suppl. 1): 321-329.
- [ 9 ] 王明凯, 王金库, 王景辉, 等. 防护热板法导热仪的温度控制 [ J ]. *计量学报*, 2022, 43(11): 1431-1437.  
WANG M K, WANG J K, WANG J H, et al. Temperature controlling for guarded-hot plate devices [ J ]. *Acta Metrologica Sinica*, 2022, 43(11): 1431-1437.
- [ 10 ] 陈相洪, 史凡萍, 杨鹏, 等. 基于高精度数字温度传感器测试系统及建模仿真 [ J ]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(7): 42-52.  
CHEN X H, SHI F P, YANG P, et al. Testing system and modeling simulation based on high-precision digital temperature sensor [ J ]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(7): 42-52.
- [ 11 ] 杨兆欣, 顾正华, 张文清, 等. 基于热电偶的低速风洞气流温度误差补偿方法 [ J ]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(5): 68-76.  
YANG ZH X, GU ZH H, ZHANG W Q, et al. The error compensation method of the low-speed wind tunnel flow temperature based on the thermocouple [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(5): 68-76.
- [ 12 ] 朱大风, 毛海岑, 尹伟, 等. 惯性平台高精度温控系统设计 [ J ]. *机械设计与研究*, 2018, 34(4): 113-115.



- ZHU D F, MAO H C, YI W, et al. High precision temperature control circuit design of inertial platform[J]. *Machine Design & Research*, 2018, 34(4): 113-115.
- [13] DAS R, NATH R. A modified darlington pair for improving the performance of voltage follower circuits [J]. *IETE Journal of Research*, 2015, 25(8): 325-327.
- [14] 贾冬宇, 冯荣尉, 温星曦, 等. 高准确度交流电压标准源电路设计与实现[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(3): 38-45.
- JIA D Y, FENG R W, WEN X X, et al. Design and implementation of high precision AC voltage standard source circuit [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(3): 38-45.
- [15] CAO Q, CHE Y, YANG J, et al. Short-circuit and open-circuit faults monitoring of IGBTs in solid-state-transformers using collector-emitter voltage [J]. *Journal of Power Electronics*, 2021, 21(7): 1-9.
- [16] 肖金根, 肖浩, 刘飞飞, 等. 基于 Flotherm 热仿真的小型半导体温控箱系统设计与实现[J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41(1): 93-98.
- XIAO J G, XIAO H, LIU F F, et al. Design and implementation of small TEC temperature control box system based on Flotherm thermal simulation [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2022, 41(1): 93-98.
- [17] 李齐艳, 邓健, 黄光明. 高可靠性智能复合开关的研制[J]. *微计算机信息*, 2010, 26(23): 175-176, 179.
- LI Q Y, DENG J, HUANG G M. Development on the intelligent compound switch of high reliability [J]. *Microcomputer Information*, 2010, 26(23): 175-176, 179.
- [18] LIU J Z. Multi point temperature measurement system based on DS18B20 [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 2534(756-759): 556-559.
- [19] 万志强, 张晴晴, 王晨, 等. 一种基于 ds18b20 传感器温度信号采集的实现[J]. *科技风*, 2018, (27): 16, 34.
- WAN ZH Q, ZHANG Q Q, WANG CH, et al. An implementation of temperature signal collection based on the ds18b20 sensor [J]. *Tech Trend*, 2018, (27): 16, 34.
- [20] 杨宁, 江志农. TMS320F2812 外部 USB 接口扩展与差分信号仿真[J]. *微型机与应用*, 2010, 29(20): 22-24, 28.
- YANG N, JIANG ZH N. TMS320F2812 external USB interface expansion and differential signal simulation [J]. *Microcomputers and Applications*, 2010, 29(20): 22-24, 28.
- [21] 陈苏波, 陈立定. 基于 PIC16F877 单片机的负压吸引装置的设计 [J]. *医疗卫生装备*, 2008, 29(11): 28-30.
- CHEN S B, CHEN L D. Development of low-pressure control system based on PIC16F877 microprocessor [J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2008, 29(11): 28-30.
- [22] EBERT H P, HEMBERGER F. Intercomparison of thermal conductivity measurements on a calcium silicate insulation material [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, 50(10): 1838-1844.
- [23] 刘晔, 张金涛, 王金库, 等. 护热板法测量高温下材料导热系数的研究 [J]. *计量学报*, 2023, 44(6): 871-877.
- LIU Y, ZHANG J T, WANG J K, et al. Study on measuring thermal conductivity of materials at high temperature by guarded-hot-plate [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2023, 44(6): 871-877.
- [24] 刘运传, 孟祥艳, 王康, 等. 一种防护热板法导热系数测量装置研制 [J]. *中国测试*, 2016, 42(3): 64-66, 72.
- LIU Y CH, MENG X Y, WANG K, et al. Development of guarded heat plate thermal conductivity measuring apparatus [J]. *China Measurement & Test*, 2016, 42(3): 64-66, 72.
- [25] 杨雯, 王莹莹, 刘加平, 等. 保护热板法导热系数测试研究综述 [J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 50(1): 57-64.
- YANG W, WANG Y Y, LIU J P, et al. A review on thermal conductivity by means of the guarded-hot-plate apparatus [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 50(1): 57-64.

### 作者简介



张领, 2022 年于长春理工大学获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向为热特性测量技术与仪器。

E-mail: zhangling111613@163.com

**Zhang Ling** received his B. Sc. degree

from Changchun University of Science and Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in Tianjin University. His main research interests include thermal characterization techniques and instruments.



**徐保峥**, 2021 年于济宁学院获得学士学位, 2024 年于天津工业大学获得硕士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为材料热物性的理论与实验。

E-mail: xbz\_9907@tju.edu.cn

**Xu Baozheng** received his B. Sc. degree from Jining University in 2021, M. Sc. degree from Tiangong University in 2024, respectively. Now he is a Ph. D. candidate in Tianjin University. His main research interests include theoretical and experimental studies on the thermophysical properties of materials.



**李艳宁** (通信作者), 1991 年于天津大学获得学士学位, 1994 年于天津大学获得硕士学位, 1997 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学教授, 主要研究方向为二维材料的光学表征技术、热特性分析仪器的智能化。

E-mail: yanningli@tju.edu.cn

**Li Yanning** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Tianjin University in 1991, M. Sc. degree from Tianjin University in 1994, and Ph. D. degree from Tianjin University in 1997, respectively. Now he is a professor in Tianjin University. His main research interests include optical characterization techniques of 2D materials and intelligent research on thermal property analysis instruments.