

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306333

基于高精度数字温度传感器测试系统及建模仿真^{*}

陈相洪 史凡萍 杨 鹏 彭 伟 杨晓强 闫军山
(中国电子科技集团公司第二十四研究所 重庆 400060)

摘 要:本文针对高精度温度传感器测温效率低,提出了一种高精度批量测温系统及其测试方法,且具有多芯测试能力。针对铂电阻 PT100 测试精度低,提出了分类法、二分扫描法、逐次逼近法对铂电阻 PT100 进行校准,校准后在-65 ℃~145 ℃温度区间最大测温误差值由 0.412 ℃变为 0.021 ℃,测温精度提升 94.9%。同时建模仿真了系统的稳定性、测温时间和测温精度,首先对恒温装置外壁到内壁和内部腔体冷流体的对流换热进行传热学建模,仿真结果表明恒温装置只需 75.2 s 便能够达到热平衡;接着对待测电路发热、基座散热、校准后铂电阻进行综合热仿真建模,仿真结果表明系统测温精度可达 0.016 ℃;最后对几款经典高精度温度传感器的外温和内温进行测试验证,结果表明系统能够对 0.031 ℃测温精度的温度传感器进行测试,系统能够很好满足测温需求。

关键词:高精度;数字温度传感器;批量测试系统;铂电阻校准;建模仿真

中图分类号: TH811;TN433 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3;510.8;510.99

Testing system and modeling simulation based on high-precision digital temperature sensor

Chen Xianghong Shi Fanping Yang Peng Peng Wei Yang Xiaoqiang Yan Junshan
(The 24th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: This article proposes a high-precision batch temperature measurement system and testing method for low temperature measurement efficiency of high-precision temperature sensors, the system with the ability testing multiple cores. This article proposes classification method, binary scanning method, and successive approximation method to calibrate the platinum resistance PT100 for the low testing accuracy of platinum resistance PT100. After calibration, the maximum temperature measurement error value in the temperature range of -65 ℃ to 145 ℃ is changed from 0.412 ℃ to 0.021 ℃, and the temperature measurement accuracy is improved by 94.9%. Simultaneously, the stability, temperature measurement time, and temperature measurement accuracy of the system are modeled and simulated. Firstly, Heat transfer modeling is conducted for the outer wall to the inner wall and convective heat transfer of cold fluid in internal cavity of the thermostatic device respectively. The simulation result shows that the thermostatic device can achieve heat balance in only 75.2 seconds. Then, the tested circuit heating up, the base heating up, and the calibrated platinum resistance is modeled by comprehensive thermal simulation. The simulation result shows that the temperature measurement accuracy of the system can reach to 0.016 ℃. Finally, the external and internal temperatures of several classic high-precision temperature sensors are tested and verified, and the result shows that the system can test temperature sensors with a temperature measurement accuracy of 0.031 ℃, which can well meet the temperature measurement requirements.

Keywords: high precision; digital temperature sensor; batch test system; platinum resistance calibration; modeling and simulation

0 引言

数字温度传感器是一款高精度数模混合信号的温度传感芯片,用于环境温度测试,其温度敏感参数是评估温度传感器性能的重要依据。在军用芯片生产过程中,须对温度敏感参数进行100%测试筛选,因此在生产测试时需要提供高精度且稳定的温度环境条件,而常规的设备提供的温度条件不能满足温度传感器的测试需求,因此开展温度传感器测试技术研究^[1],提升温度传感器测试精度和批量测试效率变得尤为重要。

国外公开对数字温度传感器的研究主要在设计方面,测试技术研究很少。在文献[2]中,国外研究人员从理论和实验上分析了金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)对温度的依赖性,旨在将其用作芯片热测试应用中的温度传感器,但需要集成在被测芯片(CUT)内部,这样对数字温度传感器不具备普适性和兼容性,且本身的功耗影响芯片实际测试结果和精度。在文献[3]中,国外研究人员采用64个铂热敏电阻从背面接触充分贴合待测温度传感器的方式,测量温度传感器的温度误差,但这些铂热电阻未被标定,且铂热电阻和被测温度传感器的周围未采用隔热措施,易受环境干扰从而影响测试结果和精度。综合国外公开文章中仅给出了温度传感器测试方案,未明确给出温度环境控制和铂热电阻校准方法,也未给出批量生产实用方案。

我国现存数字温度传感器生产企业还处在一个较低的水平,技术水平、生产能力和生产规模还达不到国际先进水平。国内高精度数字温度传感器的测试工作主要集中于科研机构如大专院校和科研院所,国内对温度传感器的研究同样主要在设计方面^[4-7]。测试方面同样仅给出温度传感器测试控制的方法:如温度传感器的建模和提升测控精度。在文献[8]中,研究者通过三维建模及流体力学分析,得到温度传感器最优的设计方案,从传感器形态设计上实现了测量误差最小化,对探空温度传感器的测量精度提升到了0.1℃的量级。但对高精度的温度传感器测量精度还是太低。在文献[9]中,研究者提出了温度传感器智能搬运技术,提出了智能搬运算法,进行了温度传感器在不同恒温水槽的温度检定点切换,实现了多批次温度传感器同时检定,但对恒温槽的温度没有进行有效的标定,从而使得温度的控制精度较低。在文献[10]中,研究者基于气体介质动态温度校准需求,研制了一套基于激波原理的气体动态温度校准装置,但这种装置未进行传热学热仿真,理论性分析不够深入,且对气体温度的控制效率较低。在文献[11]中,研究者设计了一种用于数字温度传感器的自动测试及校准系统,该系统采用恒温油槽、专用测试办卡、测试针座及测试上

位机,在I²C总线上对低精度的温度传感器进行校准,实现测试—校准—测试全自动化运行并自动保存测试结果。但未对温度传感器运用于具体测控系统环境进行分析,也未对温度传感器测试的系统环境进行建模和仿真,工程实践和理论研究性都不强。

综合上述国内外对温度传感器的研究现状,特别是在高精度温度传感器的批量测试、系统建模和仿真技术上研究很少。如何实现高精度且稳定的温度控制环境和批量测试技术仍是温度传感器的测试技术难点所在,本文从工程中搭建起高精度数字温度传感器测试系统,对铂电阻进行算法校准,并从理论上对整个系统进行建模和仿真,并从实践中进行系统验证。

1 测温系统设计

高精度数字温度传感器因其精度高、系统结构完善等特点得到广泛应用。但现有的数字温度传感器测试评估及量产在测试精度和效率方面已成为制约数字温度传感器发展的主要瓶颈之一。数字温度传感器的测试需要提供更高精度且稳定的温度环境,这是准确评估其性能的前提条件,这也给高精度数字温度传感器的批量生产也提出了考验。本文技术路线如下:根据高精度的数字温度传感器指标设计了一种数字温度传感器批量测试系统,并对测试系统的关键器件铂电阻进行算法校准,同时对系统的恒温装置及待测电路进行热仿真理论分析,在仿真的基础上,用搭建的测试系统对国外几款经典高精度数字温度传感器的外温和内温核心温度参数进行测试验证和数据分析。

本文分别对数字温度传感器LTC2991、MAX6699、MAX6636、TMP461、MAX1989、ADT7301进行外温和内温的测试。这些数字温度传感器可用温感晶体管的差分来测量其每个通道的外部温度,还可以通过寄存器的配置测试内部温度。以LTC2991为例,其测试原理图如图1所示。其中LTC2991在-40℃~85℃分辨率0.06℃,外温测温误差±1.5℃,内温测温误差±3.5℃。根据以上指标开发相应的测温系统。

1.1 硬件设计

本文提出了基于高精度数字温度传感器批量测温系统,如图2所示。

本测温系统可实现-65℃~145℃的测试范围,测试精度≤±0.016℃,校准后铂电阻PT100测温精度≤±0.021℃。系统包括电源、测试负载板、高低温试验箱、测试母板、PT100测试模块、PC上位机。

1) 电源,用于测试母板和测试负载板提供电源,并用GPIB程控电压和限流,程控电源采用IT6332B型多功能电源,最大输出电压30V,最大输出电流6A。

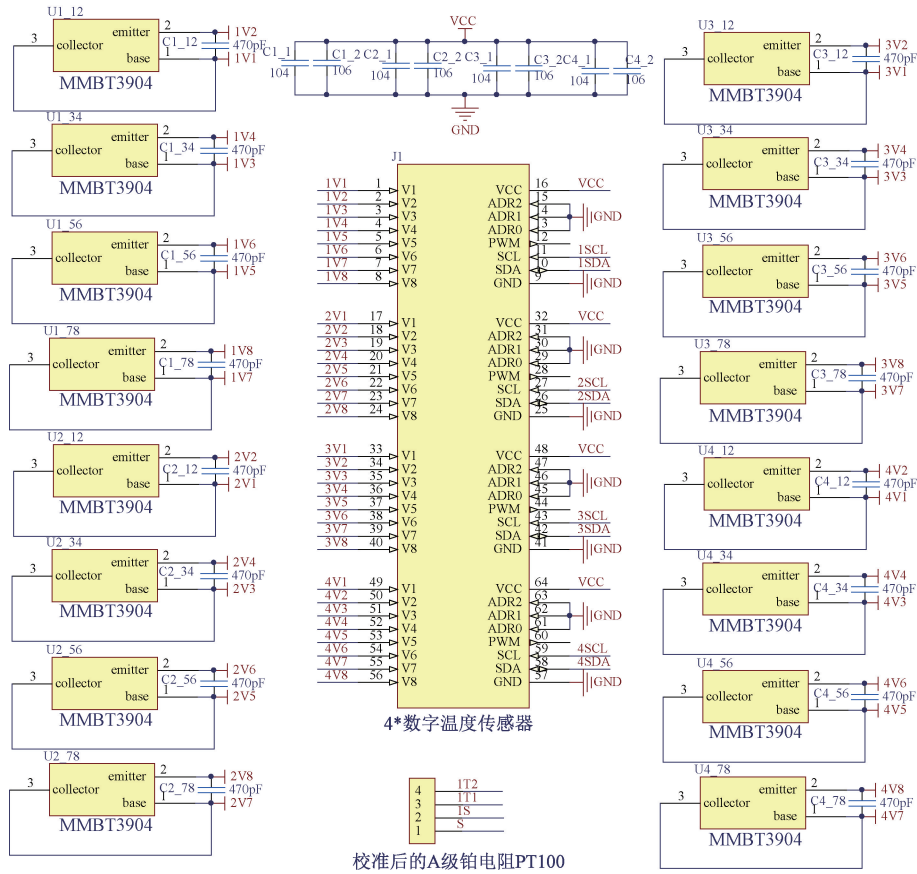


图3 测试负载板 PCB 单元设计原理

Fig.3 Schematic diagram of PCB unit design for test load board

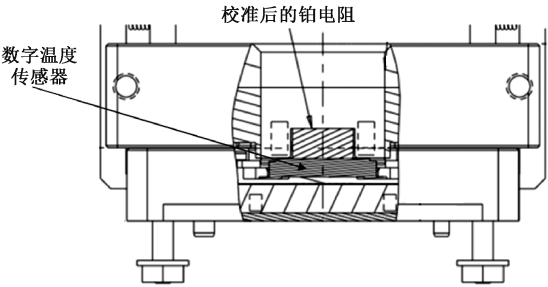


图4 恒温测试装置示意图

Fig.4 Diagram of constant temperature testing device

在-200℃~0℃范围之间:

$$R_t = R_0 \times (1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3) \quad (1)$$

在0℃~850℃范围之间:

$$R_t = R_0 \times (1 + At + Bt^2) \quad (2)$$

式中: $A = 3.9083 \times 10^{-3}$; $B = -5.775 \times 10^{-7}$; $C = -4.183 \times 10^{-12}$; R_t 为温度 t 时铂电阻的电阻值; t 为温度; R_0 为 0℃时铂电阻电阻值。

铂电阻的标定根据《JB/T 8622-1997 工业铂热电阻技术条件及分度表》标准,A 级铂电阻 PT100 未标定前使

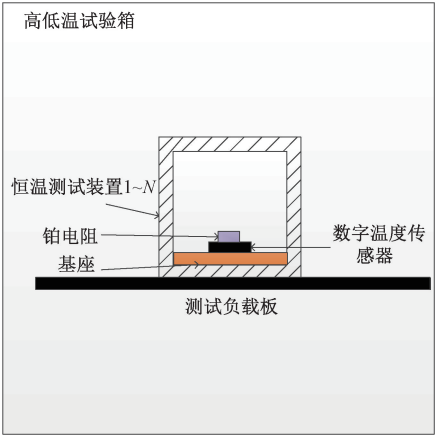


图5 试验箱和负载板结构示意图

Fig.5 Structural diagram of test chamber and load plate

用式(1)、(2)及标准 R_0 、 A 、 B 、 C 系数时,理论误差 $\leq \pm(0.15 + 0.002|t|)$ ℃,在-50℃环境下其理论最大误差为 ± 0.25 ℃,实际测试误差为 ± 0.287 ℃。145℃环境下其理论最大误差为 ± 0.44 ℃,实际测试误差为 ± 0.412 ℃,远远不能满足高精度数字温度传感器的技术

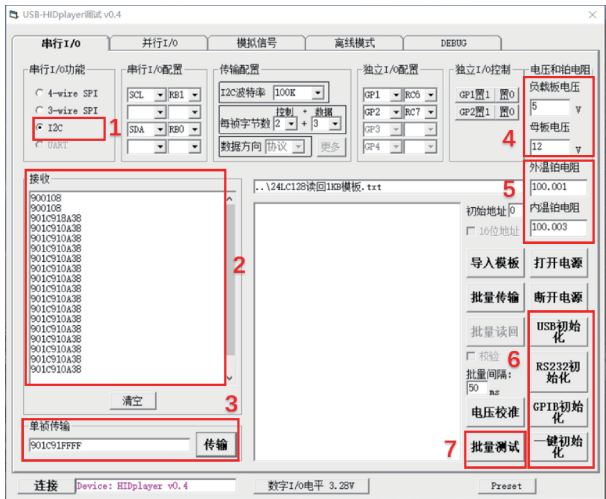


图 6 测温系统上位机控制界面

Fig. 6 Upper computer control interface of temperature measurement system

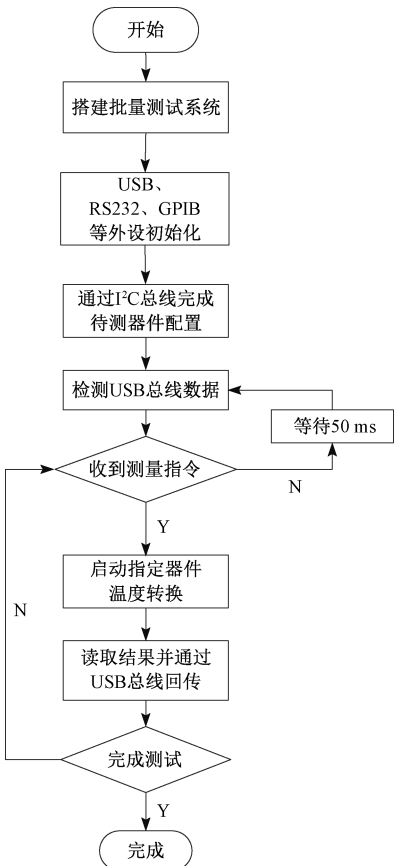


图 7 测温流程图

Fig. 7 Flow Chart of temperature measurement

需用公式进行反算从而计算出相应的温度值,便于进行标定。常采用最小二乘法^[16]、插值法和反函数法,最小二乘法和插值法精度较低,而反函数法计算量较大^[17]。这里提出 3 种算法,分别采用分类法、二分扫描法、逐次逼近法^[18],可以缩短时间,提升精度。

分类法:当 $R_t < 100 \Omega$ 时,采用式(1)进行计算,当 $R_t \geq 100 \Omega$ 时,采用式(2)进行计算。然后将选择的式子代替二分扫描法式(3)中的 $R_{t计}$ 进行计算。

二分扫描法:

$$|R_{t计} - 0.5e - R_{测}| < e \quad (3)$$

式中: $R_{t计}$ 为温度 t 时铂电阻二分扫描法的计算值; $R_{测}$ 为温度 t 时铂电阻的测试值; $t_{计}$ 为计算的温度; e 为二分扫描法设置的扫描误差,这里设置为 0.1°C ; $0.5e$ 为扫描误差的 $1/2$ 。通过计算,然后将满足不等式的 $t_{计}$ 代入式(4)进行计算。

逐次逼近法:

$$t_{逐} = t_{计} + 0.000\ 01 \quad (4)$$

$$|R_{t_{逐}} - 0.5e_{逐} - R_{测}| < e_{逐} \quad (5)$$

式中: $R_{t_{逐}}$ 为温度 $t_{逐}$ 时铂电阻的计算值; $e_{逐}$ 为逐次逼近法设置的扫描误差,这里 $e_{逐}$ 设置为 $0.000\ 1^\circ\text{C}$ 。将式(4)计算后的值代入式(5)中进行计算,如果不满足不等式,再按式(4)进行计算后代入式(5)中,如此循环,直到满足不等式输出相应的 $t_{逐}$ 值。最后求得 $t_{逐}$ 值,再将计算出来的理论值保留小数点 3 位有效值。

常用的铂电阻校准方法有非线性校准法,但精度不高,测温误差在 0.25°C 。为了使铂电阻能够达到更高的测温精度,提出一种高精度铂电阻 PT100 的校准方法:将被标定 A 级铂电阻 PT100 和一等标准铂电阻同时放入高精度恒温槽中,通过一等标准铂电阻校准获得 A 级铂电阻 PT100 实际测试的温度值,如图 8 所示。

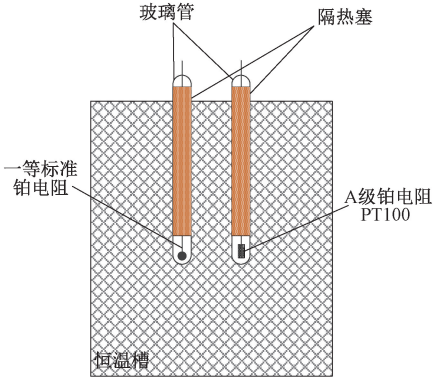


图 8 铂电阻 PT100 标定示意图

Fig. 8 Calibration diagram of platinum resistance PT100

指标需求。因此需要对测量过程中使用的每一只 A 级铂电阻 PT100 的精度单独进行重新标定。

由于测出来的铂电阻 PT100 只是单纯的电阻值,还

温度稳定后读取 A 级铂电阻 PT100 实际电阻值 R_{t_1} ,并通过一等标准铂电阻测量恒温槽实际温度 t_1 。标定过程所使用温度场的稳定性、均匀性和实际温度精度

直接决定了 A 级铂电阻 PT100 铂电阻的标定精度,因此需要使用高精度恒温槽及一等标准铂电阻保证标定环境的稳定性和精确性。标定恒温槽采用 FLUKE 公司的 7381 深井式紧凑型浴缸,该恒温槽在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内温度稳定性和均匀性 $\leq 0.007\text{ }^{\circ}\text{C}$; 一等标准铂电阻采用 FLUKE 5609 型标准铂电阻,该一等标准铂电阻在 $-200\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 420\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内精度 $\leq 0.008\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

低温(这里对应 $-65\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围)精度标定的原理是在 $-55\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内选择 3 个温度点 t_1 、 t_2 、 t_3 , 分别测量出 A 级铂电阻 PT100 在 t_1 、 t_2 、 t_3 和 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下的实际阻值 R_{t_1} 、 R_{t_2} 、 R_{t_3} 和 R_{t_0} 。分别将上述 4 组数据代入式(1)列出 4 组方程,然后通过方程解出该只 A 级铂电阻 PT100 特定的 R_0 、 A 、 B 、 C 系数。高温(对应 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围)精度标定原理与低温精度标定类似,因为高温计算公式仅包含 A 、 B 两个系数,所以 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内仅需选择两个温度点进行标定。

经验证,两只 PT100 标定前后误差对比柱状图,如图 9 所示。标定前 1 号 A 级铂电阻 PT100 在 $-65\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间测温误差 $\leq 0.412\text{ }^{\circ}\text{C}$; 标定前 2 号 A 级铂电阻 PT100 在 $-65\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间测温误差 $\leq 0.334\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。标定后 1 号 A 级铂电阻 PT100 在 $-65\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间最大误差值为 $0.021\text{ }^{\circ}\text{C}$; 标定后 2 号 A 级铂电阻 PT100 在 $-65\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间最大误差值为 $0.018\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。按照 $-65\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间最大误差值进行计算,标定后 1 号和 2 号铂电阻测试精度分别提高了 94.9% 和 94.6%, 标定后精度大幅提高。

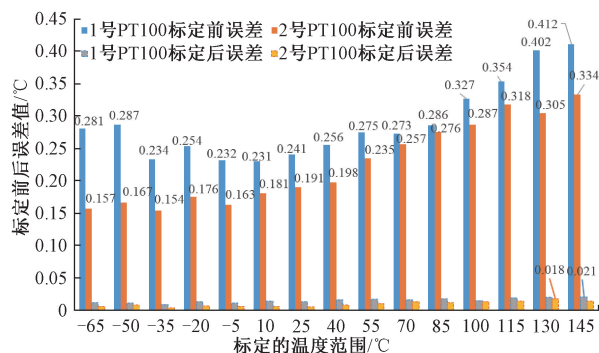


图9 两只 PT100 标定前后误差对比柱状图

Fig. 9 Error comparison histogram of two PT100 before and after calibration

A 级铂电阻 PT100 通过一等标准铂电阻和高精度的恒温槽进行标定提高了 A 级铂电阻 PT100 的准确性和精度。测试时,用标定后的 A 级铂电阻 PT100 紧贴待测温度传感器放置,能够准确获取高精度数字温度传感器实际测温值。此方法不太依赖高低温试验箱的精度,在温度场中,校准后 A 级铂电阻 PT100 和高精度数字温度

传感器会同时受到温度波动的影响,因此可以屏蔽掉高低温试验箱温度波动对测试的影响。这里 A 级铂电阻 PT100 采用四线制的接法,降低导线电阻和接触电阻对测试精度的影响^[19],四线制铂电阻测温示意图,如图 10 所示。

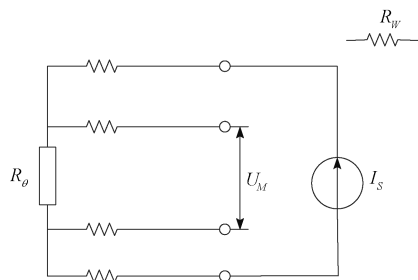


图 10 四线制铂电阻测温示意图

Fig. 10 Diagram of four wire platinum resistance temperature measurement

2.2 恒温装置温度场稳定性

温度传感器的测试采用高精度的控温设备(恒温槽或高低温试验箱)实现测试温度场。将待测温度传感器置于设备内,温度环境通过控温设备提供。常用的温控设备分为恒温槽和高低温试验箱。恒温槽常以酒精、高温硅油等作为控温介质,温度稳定性高、均匀性好等优点,适用于高精度温度验证,但由于其稳定时间长、容易使电路沾有油渍,不利于批量生产。高低温试验箱操作方便,但存在温度精度差、箱体内温度均匀性差等缺点。常规的高低温试验箱温度稳定性和均匀性指标为 $\leq \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 而高精度温度传感器精度指标最高达到 $\pm 0.125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此直接使用高低温试验箱不能满足传感器对环境温度稳定性要求。利用热传导相关理论,在高低温试验箱内部通过绝热材料设计一个密封腔体(以下简称恒温测试装置),确保腔体内部温度稳定性,进而确保数字温度传感器的精确测量。

测试前恒温测试装置置于高低温试验箱内,恒温测试装置内部空气与高低温试验箱内空气充分热交换,使其内部温度快速达到设定值。此时由于绝热材料的隔热设计,恒温测试装置外部温度需等待 t_1 时间才会造成装置内壁的温度变化,且恒温测试装置封闭后内部需要等待 t_2 时间达到温度平衡。在 t_1+t_2 时间后,可以保证装置内部温度的稳定性在 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,获得指标要求的测试温度环境。

在《传热学》^[20],热量从固体壁面一侧的流体通过固体壁面传递到另一侧流体过程称为传热过程。这一定义有其特定含义,不是泛指热量传递过程,一般来说传热过程由 3 个相互串联的热量传递环节组成:

1) 热量以对流换热的方式从高温流体传给固体

壁面;

2) 热量以导热的方式从高温流体侧壁面传递到低温流体侧壁面;

3) 热量以对流换热的方式从低温流体侧壁面传给低温流体。

在第 1 和第 3 个环节中有时还须考虑壁面与流体及周围环境之间的辐射换热,但是在高低温试验箱中是以热传导和热对流为主,因此此处暂时不考虑热辐射的影响。热传导过程示意图,如图 11 所示。

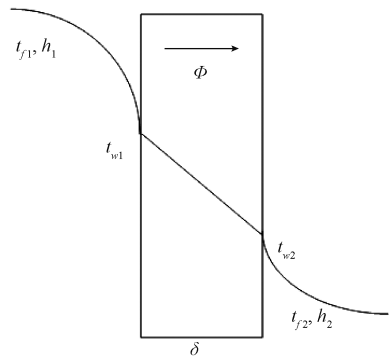


图 11 热传导过程示意图

Fig. 11 Schematic diagram of heat conduction process

图 11 为一个导热系数 λ 为常数、厚度为 δ 的大平壁,换热面积为 A ,两侧分别有冷热流体流过。平壁左侧远离壁面处的流体温度为 t_{f1} ,对流换热系数为 h_1 ,平壁右侧远离壁面处的流体温度为 t_{f2} ,对流换热系数为 h_2 ,且 $t_{f1} > t_{f2}$ 。传热过程的 3 个环节由平壁左侧的对流换热、平壁的导热及平壁右侧的对流换热 3 个相互串联的热量传递过程组成,各环节的热流量计算如下:

1) 热流体到左侧壁面的对流换热:

$$\Phi = Ah_1(t_{f1} - t_{w1}) \quad (6)$$

2) 从左侧壁面到右侧壁面的导热:

$$\Phi = A\lambda \frac{dt}{dx} = \frac{A\lambda}{\delta}(t_{w1} - t_{w2}) \quad (7)$$

3) 右侧壁面到冷流体的对流换热:

$$\Phi = Ah_2(t_{w2} - t_{f2}) \quad (8)$$

上面 3 式中的热流量 Φ 相等,联立可解得:

$$\Phi = \frac{A(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} = Ak\Delta t = \frac{\Delta t}{\frac{1}{Ak}} \quad (9)$$

其中,式(9)中的 k 为传热系数或总传热系数,单位为: $W/(m^2 \cdot K)$ 。

当壁面为平壁时,其计算式为:

$$\frac{1}{Ak} = \frac{1}{Ah_1} + \frac{\delta}{A\lambda} + \frac{1}{Ah_2} \quad (10)$$

式中: $1/Ak$ 为传热过程的总热阻,由各环节的热阻串联

而成,分别为各环节热阻; δ/λ 、 $1/h$ 为面积热阻,单位为: $m^2 \cdot K/W$ 。

由式(6)~(10)可知,恒温测试装置内部的热交换可由式(8)获得,而恒温测试装置外部温度的热传导通过式(9)获得。前者热传导系数为 Ah_2 ,后者热传导系数为 $1/Ak$,两者存在热阻差。利用该热阻差可实现一段时间内恒温测试装置内部温度稳定在 $\pm 0.01^\circ C$ 以内。由于空气自然对流的表面传热系数 h 范围是 $1 \sim 10$,相对较小可忽略。可增大热阻 $1/Ak$,也就是增大 δ/λ 和 $1/h$ 可保证恒温测试装置内温度的稳定性。

2.3 待测电路自热效应

高精度数字温度传感器在正常工作时,其耗散功耗会导致电路自身温度上升,使其自身温度可能高于被测温度,从而影响测试准确度。这一现象被称为“自热效应”。一般“自热效应”造成的温差比较小,可以用牛顿散热定律来描述:

$$P = k(t - t_1) \quad (11)$$

式中: P 为高精度数字温度传感器的焦耳热功; t 为高精度数字温度传感器自身实际温度; t_1 为高精度数字温度传感器外部环境温度; k 是散热系数,单位为: $mW/^\circ C$ 。

为确保测试准确度,应降低待测电路的“自热效应”。根据式(11)可知,“自热效应”造成的温差受待测电路功耗 P 及散热系数 k 的影响。待测电路功耗 P 由电路本身设计和工作模式决定,测试中选择功耗低的工作模式测试,如单次转换模式。此外还可以增加温度传感器的散热降低自热效应对测试精度的影响,通过恒温测试装置内设计散热结构增加温度传感器的散热,降低自热效应对测试精度的影响。

温度传感器本身产生的热量主要通过以下 3 种形式进行散热:对流、热传导、辐射。传感器总的散热量应为这 3 种散热方式的散热量之和,并与传感器本身产生的热量相当。

对流:由于数字温度传感器被封装在密闭的恒温测量装置中,故使用有限空间自然对流模型计算对流换热的散热量,相应的传热公式与换热量 $P1$ 为:

$$Gr = \frac{g\alpha(t - t_{\text{外}})L^3}{\nu^2} \quad (12)$$

$$Nu = 0.061(Gr \cdot Pr)^{1/3} = \frac{hL}{\lambda} \quad (13)$$

$$P1 = hA(t - t_{\text{外}}) \quad (14)$$

式中: Gr 为葛拉晓夫数; Pr 为普朗特数; α 为气体的膨胀系数; t 为传感器温度; L 为特征长度; ν 为气体的运动粘度; Nu 为努塞尔数; h 为对流换热系数; λ 为气体的导热系数; A 为换热面积; $t_{\text{外}}$ 为测量端实际温度。热传导:数字温度传感器平面向基座以下导热量由一维傅里叶导热公式得到,计算散热量如下:

$$P2 = A\lambda^1 \frac{dt}{dx} = A\lambda^1 \frac{(t - t_{\text{外}})}{L} \quad (15)$$

式中: λ^1 为基座材料的导热系数。

辐射: 为了方便分析, 考虑辐射传热的最大值, 即假设材料的发射率 $\varepsilon = 1$, 形状系数 $X = 1$, 辐射传热量可由辐射传热公式得到:

$$P3 = \varepsilon X A \sigma (t - t_{\text{外}}) \quad (16)$$

式中: σ 为玻尔兹曼常数。

综上所述, 最后计算总散热量与传感器本身产生的热量的数值, 由能量守恒应有:

$$P1 + P2 + P3 = P \quad (17)$$

结合式 (12) ~ (17) 可知, 考虑散热后, 待测器件“自热效应”造成的温差、受换热面积、特征长度、对流换热系数和基座材料的导热系数影响。空气自然对流的表面传热系数 h 范围是 1 ~ 10, 该值远小于基座材料的导热系数, 设计散热结构时不考虑空气对流影响。在隔热腔体内部采用导热系数大的基座材料 (铜) 设计散热结构, 可有效降低待测器件“自热效应”对测试精度的影响。散热基座结构示意图, 如图 12 所示。

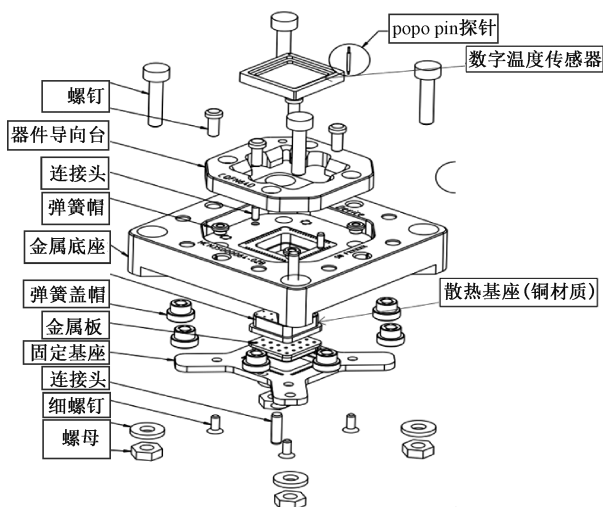


图 12 散热基座结构示意图

Fig. 12 Structural diagram of heat dissipating base

2.4 恒温装置热仿真和待测电路热仿真

下面分别采用 ANSYS 软件来对恒温装置和待测电路进行热仿真。首先分别对恒温装置外壁到内壁和恒温装置内部腔体冷流体的对流换热进行热仿真, 然后对待测电路和铂电阻进行热仿真。

恒温装置外壁到内壁热仿真: 选择 ULTEM 1000 BLACK (导热系数为 0.13 W/m · K) 作为绝热材料制作的恒温测试装置, 选用 127 °C 作为初始温度, 设置外壁对流换热系数 h_1 为 23 W/(m² · K), 内壁对流换热系数 h_2 为 8 W/(m² · K), 其恒温装置换热面积 A 设置为

6.35 cm × 6.35 cm, 厚度 δ 设置 0.85 cm, 得到外壁到内壁热仿真图, 如图 13 所示。仿真显示外壁 127 °C ~ 内壁 127 ± 0.01 °C 以内达到热平衡, 需要 5.2 s。

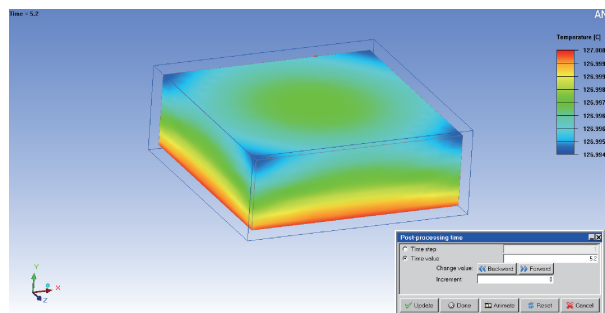


图 13 外壁到内壁热仿真图

Fig. 13 Thermal simulation diagram from outer wall to inner wall

恒温装置内部腔体冷流体的对流换热热仿真: 选用 127 °C 作为初始温度, 空气的导热系数 λ 为 0.024 W/m · K, 得到内部腔体冷流体的对流换热时间热仿真图, 如图 14 所示。仿真结果显示恒温装置内部腔体冷流体的对流换热使整个密闭腔达到热平衡温度变化量在 127 ± 0.01 °C 以内, 需要 70 s。综合恒温装置外壁到内壁热的时间, 要使恒温装置外壁到内壁再到内部腔体冷流体对流达到热平衡, 需要 75.2 s 时间。

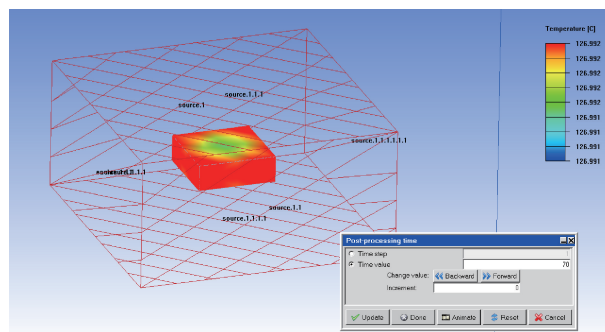


图 14 内部腔体冷流体的对流换热时间热仿真图

Fig. 14 Thermal simulation diagram of convection heat transfer time of cold fluid in internal cavity

待测电路热仿真: 对待测电路进行热仿真, 待测电路主要由芯片、焊料、塑封等结构组成。其外形尺寸为 2.10 mm × 2.10 mm × 0.80 mm, 芯片烧结区域在腔体内部金属热沉上。基于数值模拟方法对 10-Lead WQFN 型塑封集成电路进行仿真分析。仿真模型包含芯片、焊料、壳体、盖板、底部焊盘等结构, 默认气体环境设置为 1 个标准大气压条件下的空气。模拟条件设置为 JEDEC 标准环境, 在同一组模拟算例下得出, 在环境温度为 35 °C、芯片面积为 4 mm²、芯片功耗为 0.1 W 的条件下, 得到集成电路封装内部温度分布热仿真图, 如图 15 所示。可以看

出芯片最高温升为 3.653 7 ℃,芯片表面温差最大为 0.026 2 ℃。

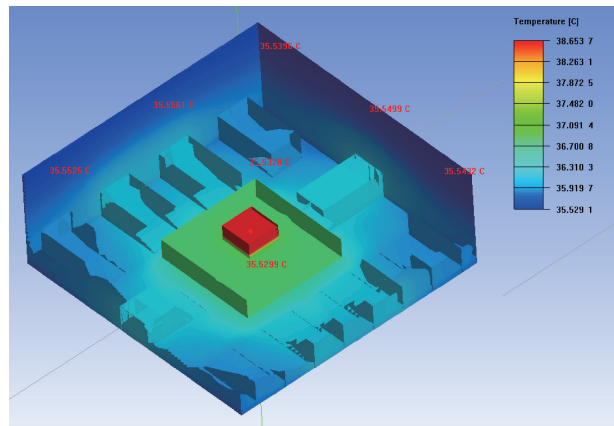


图 15 集成电路封装内部温度分布热仿真图
Fig. 15 Thermal simulation diagram of temperature distribution inside integrated circuit package

铂电阻热仿真:对放置到待测电路上的铂电阻进行热仿真,基座散热选用铜作为材料,铜的导热系数为 401 W/m · K,铂的导热系数为 71.6 W/m · K,铂电阻 PT100 外形尺寸为 8.30 mm×4.10 mm×1.20 mm,电路面积为 4 mm²、功耗为 0.1 W 的条件下,在环境温度为 35 ℃ 的情况下,电路和铂电阻 35 ℃ 热仿真图,如图 16 所示,可以看出基座散热装置、待测电路、铂电阻最高温升为 0.577 3 ℃,电路和铂电阻最大温差为 0.002 ℃。可以看出增加了基座散热装置可以有效改善系统的稳定性,铂电阻测试电路的准确性。

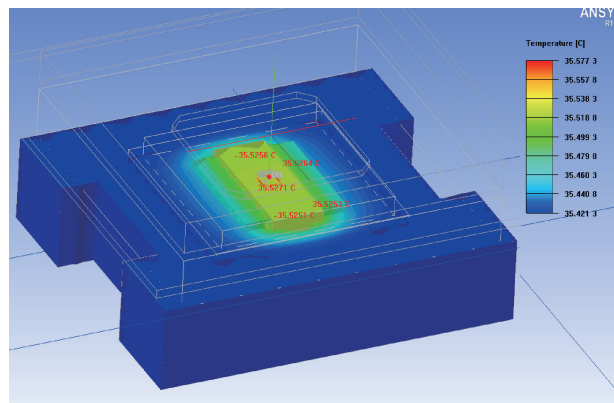


图 16 电路和铂电阻 35 ℃ 热仿真图
Fig. 16 Thermal simulation diagram of circuit and platinum resistance at 35 ℃

在环境温度为 135 ℃ 的情况下,铂电阻 135 ℃ 热仿真图,如图 17 所示,可以看出基座散热装置、待测电路、铂电阻最高温升为 1.299 ℃,电路和铂电阻最大温差为 0.016 ℃。综合 35 ℃ 和 135 ℃ 待测电路的发热、基座的

散热、电路和铂电阻的温差热仿真可以看出,铂电阻能够很好的表征待测电路的温度值。测温系统精度可达到 0.016 ℃。

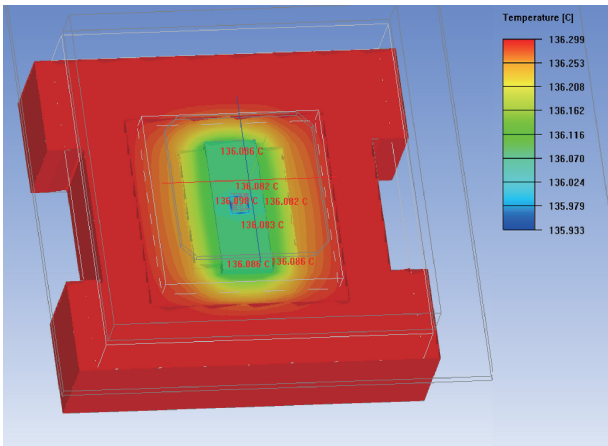


图 17 电路和铂电阻 135 ℃ 热仿真图
Fig. 17 Thermal simulation diagram of circuit and platinum resistance at 135 ℃

2.5 高精度数字温度传感器测试结果

测试采用 GJB 548B-2005 微电子器件试验方法和程序。以高精度数字温度传感器 LTC2991 测试为例,时钟频率为 512 kHz。在电源 V_{cc} 为 3.3 V,测温范围为 -55 ℃ ~ 125 ℃,恒温装置温度稳定时间 80 s 以内,在一个批次 32 样本的条件下,选择最差一只电路的误差值作为该温度传感器的测试值,如 32 只 LTC2991 的内温测试误差结果,如图 18 所示。可以看出,在 -55 ℃ ~ 125 ℃ 的温度范围内,LTC2991 温度传感器的内温测试误差保持在 ±0.7 ℃。测试结果远小于 LTC2991 手册中的最大值,符合手册中典型值,满足研究预期。

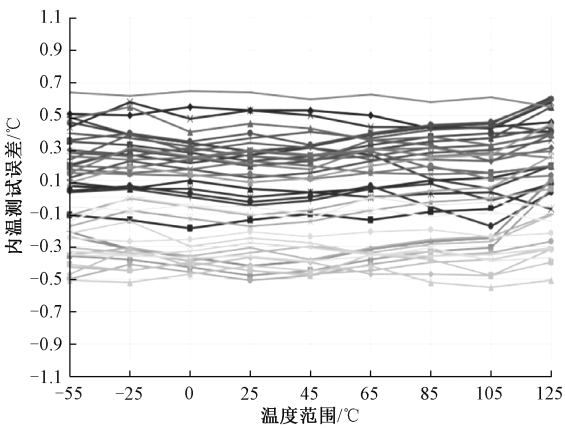


图 18 32 只 LTC2991 的内温测试误差结果
Fig. 18 Error results of internal temperature test for 32 LTC2991

使用高精度数字温度传感器批量测温系统分别对国外的高精度数字温度传感器 LTC2991、MAX6699、MAX6636、TMP461、MAX1989、ADT7301 进行外温和内温测试,测试结果如表 2 和 3 所示。

表 2 国外数字温度传感器外温测试指标

Table 2 External temperature test index of foreign digital temperature sensor (℃)

型号	测温范围	温度精度	最大值	典型值	测试值
MAX1989	60~100	—	±3.0	—	±1.4
MAX6699	0~125	1.0	±3.0	—	±1.2
MAX6636	0~125	1.0	±3.0	—	±1.2
LTC2991	-40~85	0.06	±1.5	±0.7	±0.3
TMP461	0~100	0.062 5	±0.75	±0.125	±0.125

表 3 国外数字温度传感器内温测试指标

Table 3 Internal temperature test index of foreign digital temperature sensor (℃)

型号	测温范围	温度精度	最大值	典型值	测试值
MAX6636	0~125	—	6.1~-0.1	—	-3.0~-0.1
MAX1989	60~100	—	±2.0	—	±1.0
MAX6699	0~125	—	±3.0	—	±0.7
ADT7301	-40~125	0.031 25	±3.0	—	±0.7
LTC2991	-40~85	0.06	±3.5	±0.7	±0.7
TMP461	-10~100	0.062 5	±1	±0.125	±0.125

综上所述,本高精度数字温度传感器批量测温系统能够对国外典型高精度温度传感器进行外温和内温核心温度参数测试。结果表明系统能够很好满足测温需求,满足规范最大值及典型值。

3 结 论

本文提出了基于高精度温度传感器批量测温系统及其测试方法,文中对 A 级铂电阻 PT100 的进行了算法校准,校准后在-65℃~145℃温度区间最大测温误差值由 0.412℃变为 0.021℃,精度大幅提高。然后对恒温装置及待测电路进行建模分析,对恒温装置外壁到内壁和恒温装置内部腔体冷流体的对流换热进行热仿真,仿真结果表明恒温装置只需要 75.2 s 时间,很快就能达到热平衡。接着对待测电路和铂电阻进行热仿真,综合 35℃和 135℃待测电路的发热、基座的散热、电路和铂电阻的温差热仿真可以看出,被校准的铂电阻能够很好的表征待测电路的温度值,测温系统精度可达到 0.016℃。最后对国外几款经典高精度温度传感器的外温和内温核心温度参数进行测试验证,结果表明系统能够很好满足测温需求。相信对未来温度传感器领域中,这些极具实用性的研究工作,将会推动高精度温传的测控和应用进一步发展。

参考文献

[1] 程法勇,张凯虹,郭晓宇. 数字温度传感器温度测试技术研究[J]. 电子质量,2021(10):18-21.
CHEN F Y, ZHANG K H, GUO X Y. Research on test technology of digital temperature sensor[J]. Electronics Quality, 2021(10):18-21.

[2] REVERTER F, ALTET J. MOSFET temperature sensors for on-chip thermal testing[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2013, 203:234-240.

[3] ROTH R, LENK G, KROENER M, et al. Silicon micro thermal sensor platform at high accuracy with back side contacts[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2013, 201:450-457.

[4] 李保良,李明明,李海毅,等. 基于磁致伸缩扭转波温度传感器的设计与优化[J]. 仪器仪表学报,2022, 43(10):58-65.
LI B L, LI M M, LI H Y, et al. Design and optimization of temperature sensor based on magneto strictive torsional wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 58-65.

[5] 赵勇,赵健,吕日清,等. 基于无芯光纤与光栅级联的反射式大量程高分辨力海水温度传感器[J]. 仪器仪表学报,2022,43(3):178-185.
ZHAO Y, ZHAO J, LYU R Q, et al. Reflective large-range high-resolution seawater temperature sensor based on no-core fiber combined with fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 178-185.

[6] 唐忠. 高性能低成本 CMOS 温度传感器研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.
TANG ZH. Research on high-performance and low-cost CMOS temperature sensors[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2020.

[7] 徐振涛. 低功耗单片集成温度传感器的研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.
XU ZH T. Study on low-power integrated temperature sensor on a single chip[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.

[8] 杨加春,王彦明,李庆军,等. 探空温度传感器误差预测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021, 35(12): 24-36.
YANG J CH, WANG Y M, LI Q J, et al. Research on error prediction technology of radiosonde temperature sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(12): 24-36.

[9] 孙嫣,黄磊,任燕. 基于机器人的温度传感器自动检定系统设计[J]. 电子测量技术,2021,44(9):56-65.
SUN Y, HUANG L, REN Y. Design of automatic verification

- system for temperature sensor based on robot[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(9): 56-65.
- [10] 杨兆欣, 顾正华, 张文清, 等. 基于激波原理的气体动态温度校准装置研究[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(5): 23-31.
- YANG ZH X, GU ZH H, ZHANG W Q, et al. Study on gas dynamic temperature calibration device based on shock tube principle[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(5): 23-31.
- [11] 康雄兵, 水春生, 邱宝军. 数字温度传感器自动测试及校准技术研究[J]. *中国测试*, 2022, 48(2): 119-123.
- KANG X B, SHUI CH SH, QIU B J. Study of automatic testing and calibrating for digital temperature sensor[J]. *China Measurement & Test*, 2022, 48(2): 119-123.
- [12] 蔡晓威. 一种低功耗单片机与 I²C 总线连接的设计[J]. *国外电子测量技术*, 2012, 30(8): 70-72.
- CAI X W. A design of connection of a low power MCU and I²C bus [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2012, 30(8): 70-72.
- [13] 杨明霞. 高精度铂电阻测温系统设计[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- YANG M X. Design of high-precision platinum resistance temperature measurement system[D]. Tianjin: Tiangong University, 2019.
- [14] 孙慧佳. 高精度铂电阻测温仪的设计与实现[D]. 保定: 河北大学, 2014.
- SUN H J. Design and realization of high-precision platinum resistance temperature measuring instrument[D]. Baoding: Hebei University, 2014.
- [15] 文明轩, 李珏, 王成, 等. 高精度温度传感、测量与控制技术综述[J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2021, 60: 146-155.
- WEN M X, LI Y, WANG CH, et al. Review of high precision temperature sensing, measurement and control technology [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2021, 60: 146-155.
- [16] 何镇安, 韩卫芳, 王莹, 等. 改进希尔伯特-黄变换的荧光寿命温度测量研究[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(7): 85-89.
- HE ZH AN, HAN W F, WANG Y, et al. Fluorescence lifetime temperature detection based on improved Hilbert-Huang transform [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, 40(7): 85-89.
- [17] 闫鑫. 热电偶高精度检测电路与信号处理方法研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2015.
- YAN X. The research of thermocouple's high precision detection circuit and signal processing method [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2015.
- [18] 毋天峰, 白忠臣, 张学恒. 一种高精度 CMOS 温度传感器自动校准方法[J]. *微机处理*, 2021(4): 6-9.
- WU T F, BAI ZH CH, ZHANG X H. An automatic calibration method for high precision CMOS temperature sensor[J]. *Microprocessors*, 2021(4): 6-9.
- [19] 胡鹏程, 时玮泽, 梅健挺. 高精度铂电阻测温系统[J]. *光学精密*, 2014, 22(4): 988-995.
- HU P CH, SHI W Z, MEI J T. High precision Pt-resistance temperature measurement system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 988-995.
- [20] 陶文铨. 传热学 (第五版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- TAO W Q. Heat Transfer (Fifth Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2019.

作者简介



陈相洪 (通信作者), 2014 年于东北林业大学获得学士学位, 2016 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位, 现为中国电子科技集团公司第二十四研究所工程师, 主要研究方向为混合信号集成电路测试技术。
E-mail: chenxianghong1214@163.com

Chen Xianghong (Corresponding author) received his B.Sc. degree in 2014 from Northeast Forestry University, received his M. Sc. degree in 2016 from Harbin Engineering University. Now he is an engineer in China Electronics Technology Group Corporation 24rd Institute. His main research interest includes mixed signal integrated circuit testing technology.