

温度计量测试中热电偶测量精度影响因素分析及改进

吕红贵

四川衡准检测技术有限公司, 四川 成都 610101

DOI:10.61369/ETQM.2026010026

摘 要 : 温度计是一种可广泛应用在工业、医疗、科研等领域的测量温度的仪器,但在不同的领域,温度计所测量的范围也不一样,在航天、冶炼金属等涉及 1000℃ 以上环境,需要热电偶、辐射温度计等专用高温温度计,为了精确实验测量精度,将此次实验分为三个挡位,高温档(500℃ 以上)中温档(100–500℃)低温档(100℃ 以下),同时,避免热平衡的变化,使实验测量准确,良好的响应特性所以在测量中热电偶不接触被测物。本次实验将测温系统与单片机予以融合,实现智能化测量,目标是打造一套把热电偶用作温度传感器的测温系统,在 STM32L476 芯片的调控作用下,该温度计借助 DS18B20 温度传感器开展实时温度检测与显示工作,能够实现对环境温度的快速测量。

关 键 词 : 单片机; 热电偶; 温度测量系统

Analysis and Improvement of Factors Affecting Thermocouple Measurement Accuracy in Temperature Measurement Testing

Lv Honggui

Sichuan Hengzhun Testing Technology Co., Ltd. Chengdu, Sichuan 610101

Abstract : A thermometer is an instrument that can be widely used in industrial, medical, scientific research and other fields to measure temperature. However, the range of temperature measured by a thermometer varies in different fields. In aerospace, metal smelting and other environments involving temperatures above 1000℃, specialized high-temperature thermometers such as thermocouples and radiation thermometers are required. In order to achieve precise experimental measurement accuracy, this experiment is divided into three stages: high temperature stage (above 500℃), medium temperature stage (100–500℃), and low temperature stage (below 100℃). At the same time, to avoid changes in thermal balance, the experimental measurement is accurate and has good response characteristics. Therefore, thermocouples do not contact the measured object during measurement. In this experiment, the temperature measurement system will be integrated with a microcontroller to achieve intelligent measurement. The goal is to create a temperature measurement system that uses thermocouples as temperature sensors. Under the control of the STM32L476 chip, the thermometer uses the DS18B20 temperature sensor to perform real-time temperature detection and display, enabling rapid measurement of environmental temperature.

Keywords : microcontroller; thermocouple; temperature measurement system

一、温度计量测试中热电偶的测量精度影响因素分析与改进方案

(一) 影响因素分析

1. 热电偶种类影响

热电偶作为温度测量的“核心感应元件”,其材质纯度、结构完整性直接决定测量基准的可靠性,是最根本的影响因素。热电偶的热电势(测温核心信号)由两种金属的“热电特性差”决定,若材质含杂质(如镍铬合金中混入铁、碳),会改变热电势-温度对应关系,导致与标准分度号(如 K 型、S 型)偏差。

2. 配套组件的影响

分度号不匹配:补偿导线需与热电偶分度号完全一致(如 K 型热电偶配 K 型补偿导线),若错用(如 K 型配 E 型),会因热

电特性差异产生“附加热电势”。例如:20℃ 环境下, K 型错配 E 型补偿导线,每米导线会引入 $\pm 3^\circ\text{C}$ 误差。

材质杂质与线径:劣质补偿导线含杂质多,或线径过细(导致电阻过大),会在信号传输中产生电压损耗;若导线屏蔽层破损,还可能受外界电磁干扰(如工业电机、变频器),导致读数波动。

敷设方式不当:补偿导线若与动力电缆并行敷设(距离 $< 10\text{cm}$),会被电磁感应干扰;若敷设路径存在较大温度梯度(如从高温车间穿到低温控制室),导线自身产生的热电势会叠加到测量信号中。

热电偶的热电势仅与“热端温度(T)-冷端温度(T_0)”的差值相关,需通过冷端处理保证 T_0 稳定(理想状态 $T_0=0^\circ\text{C}$),常见问题包括:

冷端温度波动：若冷端暴露在室温变化的环境中（如靠近空调出风口、热源）， T_0 随室温波动（如 $10^{\circ}\text{C}\rightarrow 25^{\circ}\text{C}$ ），会直接导致测量误差（ T 测量值=实际 $T-\Delta T_0$ ， $\Delta T_0=25-10=15^{\circ}\text{C}$ 时，误差即达 15°C ）。

冷端补偿器失效：自动冷端补偿器（如半导体补偿模块）若未校准、或超出补偿范围（如标注补偿范围 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，实际冷端达 60°C ），会导致补偿值偏差；手动补偿（如冰浴法）若冰块融化、冰水混合物温度高于 0°C ，也会引入误差。

多支热电偶共用冷端：多支热电偶共用一个冷端补偿装置时，若某一支热电偶断线或短路，可能导致整个冷端补偿电路异常，影响所有热电偶的读数。

3. 外部环境因素

测量环境的温度、电磁、气氛等条件，会通过“干扰信号”或“腐蚀热电偶”间接影响测量准确性。

环境温度梯度与热辐射：若热电偶探头周围存在局部高温热源（如邻近的加热管），即使热端未直接接触，也会通过热辐射使测量端温度升高，导致读数偏高（如实际介质温度 100°C ，辐射影响下读数达 105°C ）。

环境气流速度过快（如强冷风直吹热电偶），会加速测量端的热量散失，尤其在低温测量（如 -50°C ）时，易导致读数偏低。

电磁干扰：工业现场的变频器、高压电机、电焊机等设备会产生强电磁辐射，若热电偶未采用屏蔽补偿导线、或屏蔽层未单端接地，电磁信号会耦合到热电势中，导致读数波动（如正常读数 100°C ，波动范围 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ）。

介质气氛影响：热电偶在腐蚀性气氛中（如含硫、含氯的高温气体）会被腐蚀，例如：K型热电偶（镍铬-镍硅）在含硫气氛中，镍会与硫反应生成NiS，破坏热电特性；还原气氛（如氢气环境）会导致某些热电偶（如S型，铂铑-铂）的铂被还原，纯度下降，热电势漂移。

（二）热电偶改进方案

热电偶能够测量高温且成本较为低廉，因此备受青睐，本次实验在温度计量测试领域展开，目的是探究于氧化以及中性气体环境里，热电偶的偶丝直径和其测温范围之间是否存在关联。同时，为保障有效热电偶不受损害，所以外部环境在还原气氛中密封保护管进行实验。

在对温度计量测试中，通常要考虑其使用温度范围和允许误差，基于此，可将热电偶的精度进行划分，如表2-2：

表2-2 温度计量测试中热电偶等级表

| 等级 | 允许误差 | 使用温度范围 ($^{\circ}\text{C}$) |
|----|---------------------------|-------------------------------|
| I | $\pm 1.6^{\circ}\text{C}$ | 0~400 |
| | $\pm 0.4\%t$ | 400~1100 |
| II | $\pm 3^{\circ}\text{C}$ | 0~400 |
| | $\pm 0.75t$ | 400~1300 |

实验前提明确热电效应在热电偶测温电偶丝实验中具体处理方法：使得冷端温度和热端温度存在温度差（冷端不做处理然后对热电偶的热短进行加热），在热电偶的回路中产生热电势。

当金属A与材质不同金属B而相互接触时，在二者的接触区域会出现电子扩散情况，从而产生接触电势，其电势的定义公式如下：

$$e_{AB}(T) = \frac{k_0 T}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}$$

式中： $1.6 \times 10^{-10}\text{C}$ ， k_0 其具体数值为 $1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$ ；。

式中： T 表示绝对温度，电子所带电荷量用 e 来代表，它的数值是 $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ ；金属材料A和B中的自由电子密度分别由 n_A 与 n_B 来表示；玻尔兹曼常数是 k_0 为玻尔兹曼常数 $k_0=1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$ 。[1-4]

在对其中某一种金属开展加热操作之际，两种金属之间就会产生温度差异。在这样的情形当中会使二者两端自由电子的浓度呈现出差别，从而产生温差电势，下面是该电势的定义：

$$e_A(T_0, T_1) = U_{T_0} - U_{T_1}$$

在实际情况当中，然而同一种金属所产生的温差电势极其微小所以是能够忽略的。倘若将金属A的两端同时放置到高温与低温这两种温度不同的环境里，并且要满足 $T_0 > T_1$ 的条件，那么热电偶的闭合回路电势 $E_{AB}(T_0, T_1)$ 可以表示为：

$$E_{AB}(T_0, T_1) = e_{AB}(T_0) - e_{AB}(T_1) = \frac{K}{e}(T_0 - T_1) \ln \frac{n_A}{n_B}$$

以冷端温度当作参照基准的情况下，该公式表达的是金属AB热端对应的温度数值，在测温实验开展的时候要保证把冷端温度始终恒定，保持在 0°C 以此来确保实验具备精确性。所以需要通过 $E_{AB}(T_0, 0)$ ， T_0 和 $E_{AB}(T_0, T_1)$ 求出，这就是冷端温度补偿的过程。[5-8]

此次实验在多样的冷端补偿手段里，选取了物理途径中的冰点补偿法：将冷端补偿导线的末端放置到 0°C 的冰水混合物恒温装置当中，通过这样的方式来消除冷端温度所产生的误差。

静态校准过程如下：1.将热电偶量程以固定间距均匀划分成 n 个点，依据经过等分处理之后的标准量，依照由小至大的顺序逐个输入，3.操作方式与步骤2完全相同，不过需按照从大到小的顺序逐个输入。重复步骤2与步骤3并记录对应的测试结果。[9]

（三）总体方案

1. 设计需求

基于温度计量测试中热电偶的温度测量系统的指标、主要功能如下：

（1）对多处环境温度实施测量采用的是温度计，以及热电偶式温度传感器。

（2）测量范围涵盖三个温区：高温档 500°C 以上，中温档 $100\sim 500^{\circ}\text{C}$ 之间，低温档低于 100°C ，其精确度能够达到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

（3）利用LCD液晶显示记录实际的测量温度值。

（4）设置自主告警极限温度。

（5）当温度超过上、下限报警温度后，自动发出声光报警。

2. 设计需求

本次温度计量测试中热电偶的温度测量系统实验设计主要针对高温物体的温度测量，具体测量温度分为三个档位，测量前先预估待测物体的温度并选择合适的档位测量以提升测量的准确度和精确度。基于温度计量测试中热电偶的温度测量系统的总体设计方案。

（四）功能介绍

在非接触式温度的计量测试当中，热电偶温度传感器被测温系统选用，主要依托于单片机STM32L476来实现的是测控系统所具备的数据采集处理、显示以及报警等功能。

选用构建更为简洁且反应迅速的温控系统，旨在数字温度传

感器,便于单片机开展精准控制以及高效处理的是其输出信号彻底数字化。此举省去了采样运放还有长距离传输时所需的串/并转换电路以及数/模转换,极大缩短了系统运行时间,简化了电路结构同时降低了硬件成本。为测温系统的应用提供有力支持的该传感器,能够快速测量环境温度,进行实时温度的检测并显示。

二、温度计量测试中热电偶的温度测量系统硬件设计

(一) 核心控制系统设计

STM32L476Gxx 器件集成 QuadSPI 闪存接口和高速嵌入式存储器(有128KBSRAM与1MB闪存),以及灵活的外接存储控制器(FSMC)并配备多种增强型 I/O 端口和外设模块。其总线架构含有2条 AHB总线和2条 APB总线,借助32位多 AHB总线矩阵达成互联。

针对嵌入式闪存与 SRAM,STM32L476Gxx 器件集成了多种保护机制,其中包括读保护、写保护、专有代码读保护以及防火墙功能。该器件配备四个数字滤波器并支持外部 SigmaDelta 调制器(DFSDM),集成12路 ADC(采样率达5MSPS),内置三种类型的闪存设备且配备两个运算放大器、两个比较器以及两条 DAC 通道。定时器资源涵盖两个32位通用定时器和两个低功耗16位定时器,支持低功耗模式的 RTC和七个16位通用定时器,以及两个专用16位 PWM 电机控制定时器。此外24个电容感测通道由器件提供内置转换器,且支持内部配置,集成了同时8×40规格或4×44规格的 LCD 驱动器。

(二) 温度采集系统设计

在温度计量测试中,热电偶传感器的选择直接决定了测量结果的可靠性和精度,所以为了确保系统的稳定运行,本次设计需根据具体应用场景选择合适的热电偶类型。

例如,在高温环境下,通常选用具有较高的耐温能力和良好的抗氧化性能的 S型或 B型热电偶;而在低温环境中,选用灵敏度高且成本较低的 K型热电偶则更为适用,为了减少外部环境对测量信号的干扰,热电偶的安装方式也需要结合实际工况进行优化。

(三) LCD 显示系统设计

具备高亮度显示优势的是 LED 数据显示终端,不过每只数码管仅能呈现单一字符这使得引脚数量众多接线过程也十分繁琐。而且在字符信息量增多的情况下,要针对不同信息设计各异的字符,此外若所显示字符代表的信息与功能没有明确说明,观察者将难以理解这无疑给使用者带来了不便。

液晶显示器件种类很多,例如:HG1286401C 显示器具备直接显示阿拉伯数字字符以及汉字的能力,它使用起来十分便捷,显示结果直观可视,我们选定 LCD1602 作为显示电路方案正是鉴于此。不仅具备背光功能以及字符对比度调节等优势,1602 型液晶显示模块还可显示丰富字符。

三、基于温度计量测试中热电偶的温度测量系统软件设计分析

(一) 主程序流程

在设计基于温度计量测试的热电偶温度测量系统时,系统会

检测四路信息,并把它们传送到 STM32L476 里,随后对系统预设温度进行设置借助四个中断服务程序来完成,每当触发中断的时候,预设温度值要么增1要么减1。待测对象的实时温度会被系统拿来与预设报警温度做比对,然后根据比对所得结果来采取对应的措施:若 LCD 显示正常,则无需进一步操作;声光报警会在未显示的情况下触发,方便工作人员及时处理。

(二) 温度采集流程

本设计搭建起一个温度测定系统,此系统以多通道模数转换器为基础,它借助采集多个位置的温度数据,并且针对各个点的温度开展积分运算来进行数据处理,最终达成对真实温度值的精确确定与精准控制。

在软件项目开展实施期间运用中断机制,达成数据的存储以及处理,具体来讲一旦输出电平发生变动,这就意味着数据转换流程已然顺利结束而且中断技术已成功应用在微控制器当中。

(三) 显示程序流程

程序设计过程中,对所设温度值与当前温度值借助 LCD 进行控制显示,这样我们就能够直观观测到设定温度以及当前温度,此程序部分的目的是达成当前温度值的展示,重点是合理设定液晶显示器的初始化命令,使显示器能够显示我们想要的效果。

四、温度计量测试中热电偶的温度测量系统改进结果分析

(一) 软件仿真

开展仿真研究于 MATLAB 软件平台,以验证基于温度计量测试的热电偶温度测量系统的可行性,在对该系统测量精度展开验证的进程里,能够实时测定处于被加热状态的工件在任意时刻的温度数值,并且依据这些数值开展误差计算工作。在热处理过程里此方法对温度测量以及控制的优化颇有帮助,能够让控制精度得到提升同时使系统自动化水平得以提高。

(二) 仿真环境

在一个操作便捷的独立窗口界面下, MATLAB 集成了跨科学领域的多种算法功能,涵盖建模仿真及图形展示等其名源自“矩阵实验室”。科研与工程设计的各个领域,都全面渗透着它广泛的应用范畴,在电子生物通信及金融等行业占据举足轻重地位的主要应用领域包含工程计算,嵌入式与控制系统信号检测以及图像处理与分析等。新型试剂盒能配置编程所需的基础程序,而 MATLAB 操作简便无需编写基础程序,其工具箱丰富,覆盖三十余个科学领域。允许用户根据个人需求进行必要修改,所有工具箱的函数源程序均公开,用户可通过编程进行仿真分析。

(三) 工作流程

在热电偶的测温系统平台所处的温度计量测试领域里,其工作流程包含两种模式:系统平台能够执行处理操作其一是手动输入图像,自动随即处理显示相应结果从而获取对应的温度值以及误差数据。

系统平台在第二种自动模式里会预先将定时器时长设定好,进而自行开展图像存储与采集操作,随即实时计算温度及误差,待图像自动处理完毕后将相关数据同步显示。

(四) 仿真结果

在温度计量测试领域,借助热电偶构建的温度测量系统平

台,关于其计算得出的温度值和标定温度的统计结果具体情况在表1中呈现。

表1 计算温度值与标定温度统计结果

| 标定温度 /℃ | 高温档 | | | 中温档 | | | 低温档 | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| | 500 | 600 | 800 | 450 | 300 | 200 | 80 | 50 | 30 |
| 计算温度 | 500.1 | 600.4 | 800.7 | 499.6 | 300.2 | 200.1 | 80.1 | 49.8 | 29.8 |
| 计算误差 | +0.1 | +0.4 | +0.7 | -0.4 | +0.2 | +0.1 | +0.1 | -0.2 | -0.2 |

在表1里呈现出高、中、低三个温度档位的状况下,计算误差全都没有超过3.5%能够满足工业应用的需求,此外对实时温度计算算法予以优化,同时增加标定温度样本数量可进一步减小误差。

对最近十次记录的温度值与标定温度值在热电偶温度测量系统(该系统应用于温度计量测试领域)中展开对比分析,相关结果展示于图1。

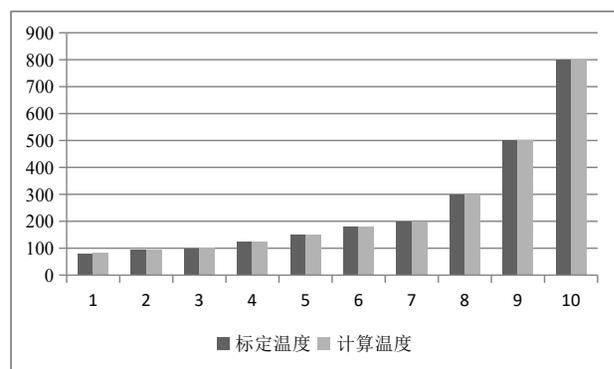


图1 近十次的温度值与标定温度值比较结果

在温度计量测试领域经于仿真平台开展对比分析,从图1能够看到基于热电偶构建的温度测量系统,该系统测得的温度值和标定温度值之间误差较小,基本上能够实现对温度的有效测量。

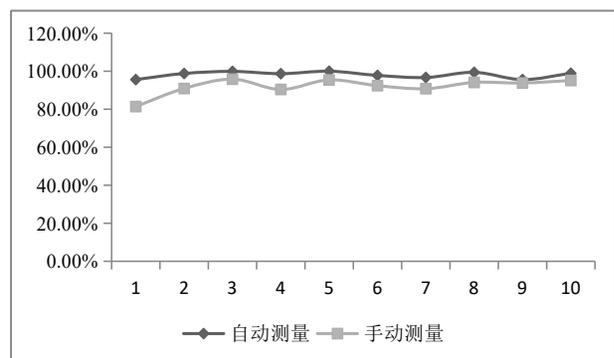


图2 基于温度计量测试中热电偶的温度测量系统中近十次温度检测结果的准确率

把最近十次检测获取的基于温度计量测试的热电偶温度测量系统的温度准确率,同手工温度检测的准确率予以对比,具体对比结果在图2中详细呈现。

在图2展示的实验结果里能清楚看到,本设计所基于的温度计量测试中的热电偶温度测量系统于整体检测准确率方面有着出色表现,精度达到了较高的水平。在实际工业应用以及科学研究里,该系统呈现出良好的稳定性与可靠性,具备显著的实际应用潜力与推广意义故而如此。

五、结论

本次实验以采用热电偶作为温度传感器的温度测量系统作为设计对象,着重于温度计量测试领域,全面深入探究温度测量数据采集过程,广泛查阅国内外海量关于采集设备的文献资料。根据测温系统具体的设计要求,将温度采集的总体设计方案进行精心拟定,为确保系统拥有高精度与高可靠性这一设计目标,选用热电偶进行温度采集。此热电偶需具备优良线性度,强大稳定性高测温精度同时热电动势大测温范围广,在完成温度采集模块通信方式以及显示装置的设计工作中,测温系统综合运用了多方面知识,涵盖传感器技术单片机技术 LCD 显示技术以及数字电子技术等。

此次实验把 STM32L476 单片机选作测温系统的核心部件,在温度计量测试环节里借助 ADS1248 针对热电偶产生的电动势开展采样工作。同时将信息采集传输存储处理以及单片机通信技术进行有效整合,以此实现对温度的实时监测判断被测场所的温度是否处于适宜范围。整套系统复杂且实用的功能鉴于单片机对数字信号具有的高度敏感性,良好可控性以及温度传感器所具备的高准确性得以通过简易软件编程达成。该测温系统更易于契合实际应用需求,具备功能完备电路简洁应用便捷的特点。

参考文献

- [1] 孙岩. 光纤荧光接触式测温系统研究及实现 [J]. 电气技术, 2018, 19(02): 49-53.
- [2] 余国卫. 基于单片机的温度计量测试中热电偶测温系统 [J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(24): 206-207.
- [3] 李竹青. 运动目标表面温度非接触在线自动测量系统的研究 [D]. 河北科技大学, 2016.
- [4] 李峰, 王贵锋. 非接触式红外数字测温系统的设计与实现 [J]. 自动化与仪器仪表, 2016(08): 188-189.
- [5] 明军. 接触网线夹非接触测温系统研究 [D]. 石家庄铁道大学, 2016.
- [6] 胡家骏. 红外非接触测温系统设计与实现 [D]. 黑龙江大学, 2016.
- [7] 张玲娜, 李想. 基于 MLX90615 传感器的人体非接触式红外测温系统设计 [J]. 电子测试, 2014(S1): 19-21.
- [8] 龚恒. 碳素钢热处理温度非接触式测量系统研究 [D]. 西南大学, 2014.
- [9] 王锦, 门长贵. 煤气化炉炉壁温度计量测试中热电偶测温技术 [J]. 化工自动化及仪表, 2014, 41(04): 349-351+376.