

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105810

基于 LabVIEW 和蓝牙 Mesh 组网的无线测温系统*

陈鸿海 赵鹤鸣 邵雷
(苏州大学 电子信息学院 苏州 215006)

摘要: 在传统的多点分布式测温系统中,存在布线复杂、成本增加和数据处理实时性要求等问题,因此设计了一种采用蓝牙 Mesh 组网技术实现多点无线测温的系统。该系统以 ARM 为核心开发板,PT100 作为测温传感头,采用 16 位高精度的模数转换器 ADS1110 将 PT100 温度传感器输出的温度信号进行采集,通过蓝牙螺旋天线实现温度信号的无线传输,利用 LabVIEW 界面实时显示温度变化的曲线,同时可以进行温度报警和温度数据的保存。将一种最小二乘法 and 数字滤波相结合的方法应用于温度数据的标定,以消除系统误差和干扰信号的影响,得到高精度的温度值。实验测试结果表明,本测温系统具有低成本、低功耗、高精度、操作方便等优点,同时测温精度可达 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,可广泛应用于温度信号的实时采集与处理,在生产生活中具备一定的实用价值。

关键词: 多点无线测温;LabVIEW;蓝牙 Mesh 组网;PT100

中图分类号: TH811 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4010

Wireless temperature measurement system based on LabVIEW and Bluetooth Mesh networking

Chen Honghai Zhao Heming Shao Lei

(School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: In the traditional multi-point distributed temperature measurement system, there are problems such as complex wiring, increased cost and real-time data processing requirements. Therefore, this paper designs a system that uses Bluetooth Mesh networking technology to achieve multi-point wireless temperature measurement. The system uses ARM as the core development board, PT100 as the temperature sensor head, uses 16-bit high-precision analog-to-digital converter ADS1110 to collect the temperature signal output by the PT100 temperature sensor, and realizes the wireless transmission of the temperature signal through the Bluetooth spiral antenna. Use the LabVIEW interface to display the temperature change curve in real time, while temperature alarm and temperature data can be saved. A method combining the least squares method and digital filtering is applied to the calibration of temperature data to eliminate the influence of system errors and interference signals and obtain high-precision temperature values. The experimental test results show that the temperature measurement system has the advantages of low cost, low power consumption, high precision, and convenient operation. At the same time, the temperature measurement accuracy can reach $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, which can be widely used in the real-time acquisition and processing of temperature signals. It has certain practical value in it.

Keywords: multi-point wireless temperature measurement; LabVIEW; Bluetooth Mesh networking; PT100

0 引言

随着蓝牙技术的快速发展与普及,使得蓝牙 Mesh 技术广泛应用于生产生活中,而温度作为日常生活中的一个重要物理量,实现对其精确检测和控制就显得尤为重要。由于传统的测温方式存在精度低、可靠性差、成本高等不

足,已经无法满足在特殊环境条件下的温度测量,因此需要系统具有无线数据传输并且具备多点测温的功能^[1]。目前在生产生活中应用最广泛的温度传感器主要有热电偶、热电阻、热敏电阻、集成温度传感器等,以铂热电阻 PT100 作为测温传感器非常普遍,它具有准确度高、稳定性好、测温范围广等优点,不过 PT100 的非线性、阻值偏差等因素会

收稿日期:2021-02-08

* 基金项目:国家自然科学基金(61803278)项目资助

降低测量精度^[2],故而需要对 PT100 进行标定和校准,以满足多点高精度实时测量的需要。

考虑到各种无线通信技术的应用范围、数据传输成本、安全性、可靠性以及自组网能力等因素,本文采用蓝牙 Mesh 组网技术和 PT100 温度传感器实现多点温度的采集、温度数据的无线传输以及上位机对上传数据的存储、显示、报警等功能^[3]。该测温系统利用蓝牙 Mesh 组网技术进行近距离无线测温模块的分散布局,通过手机 APP 实现温度采集模块与温度接收模块的蓝牙 Mesh 组网。温度接收模块以蓝牙螺旋天线实现和温度采集模块的实时通信,同时接收其他温度采集模块合法蓝牙端点传输过来的温度数据,并把有效的温度数据按要求上传给上位机,并利用 LabVIEW 软件对所有节点的温度数据进行监控和显示,最终实现温度的精确测量,以便及时发现问题,从而降低生产生活的损失。

1 测温原理与方案

1.1 PT100 测温原理

铂热电阻 PT100 是利用金属铂的电阻值 R 随温度变化而变化的物理特性制成的温度传感器^[4],具有准确度高、性能稳定、互换性好、耐腐蚀以及使用方便等一系列优点。PT100 测温的本质就是测量传感器的电阻,将电阻的变化转换成对应电压或电流等模拟信号的变化,再将模拟信号转换成对应的数字信号,再由处理器换算成相应的温度^[5],测温原理如图 1 所示。

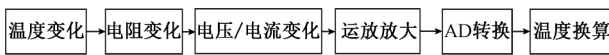


图 1 PT100 测温原理

在 $-200\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,PT100 电阻阻值与温度的关系可以近似用下式表示^[6]。

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2) \quad (1)$$

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 - 100\gamma t^3 + \gamma t^4) \quad (2)$$

式中: α, β, γ 为常数; R_t 为 $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值; R_0 为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值。PT100 电阻-温度关系曲线如图 2 所示。

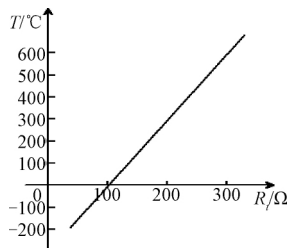


图 2 PT100 电阻-温度关系曲线

PT100 电阻一般有 3 种接法,分别是二线制接法、三线制接法和四线制接法,如图 3 所示,不同的接法适用于不同

精度要求的场合,本文采用三线制接法,将 PT100 两侧相等的导线长度分别加在两侧的桥臂上,能够有效减少 PT100 引线电阻对测温精度的影响^[7]。

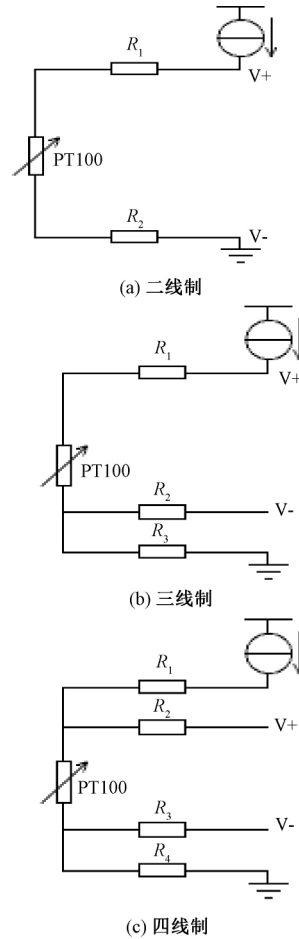


图 3 PT100 三种接线方式

在实际测试时,由于铂热电阻阻值与温度之间存在非线性的缺点,在利用铂热电阻进行精确温度测量时必须对这种非线性误差进行必要的校正,以减小非线性误差的影响,确保测量的精度^[8]。

1.2 桥式测温电路

电阻的测量方法有多种,常用的有分压法、恒流法、电桥法。本文主要采用惠斯通电桥电路进行电阻的测量,电桥测量的原理就是桥式测温电路将温度信号的变化转化为电压信号的变化,然后比较两个分压电阻中间的电压值,电桥电路如图 4 所示,桥式测温电路采用 3.3 V 电源供电, R_5, R_{16}, R_{17} 和 PT100 构成电桥测温电路。流过 PT100 温度传感器的电流必须大小适中,既不能过小以保证铂电阻传感器的灵敏度,又不能过大,避免铂电阻内部受热过度造成误差增大^[9],因此 PT100 的最佳工作电流应控制在 1 mA 以内^[10]。

测温范围决定了除 PT100 以外其他 3 个电阻的阻值: 1)PT100 作为桥式测温电路的一个上臂,由于测温范围的

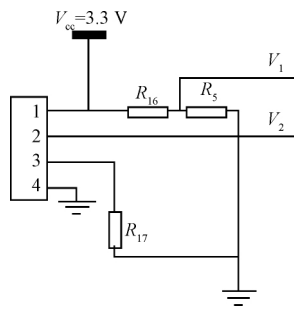


图 4 PT100 电桥电路

最低值为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 故而另外一个上臂的电阻阻值最好小于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 PT100 的阻值; 2) 下臂的两个电阻的阻值: (1) 保证流过 PT100 的电流不能超过 1 mA , 否则会导致 PT100 自身发热, 影响对温度的测量; (2) 一般远大于 PT100 的阻值, 减少电阻分压导致的非线性。所以根据以上电阻阻值选取的原则, 最终确定 $R_5 = R_{17} = 3.3\text{ k}\Omega$, $R_{16} = 90\text{ }\Omega$, 为抑制温漂和减小计算误差, 电阻均选用精度为 0.01% , 温度漂移 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ^[11] 的低温漂高精度电阻。

电桥测温电路的输出电压为:

$$V = V_1 - V_2 = V_{cc}R_5 / (R_5 + R_{16}) - V_{cc}R_{17} / (R_{PT100} + R_{17}) \quad (3)$$

当 $R_{16} \times R_{17} = R_5 \times R_{PT100}$ 时, 电桥平衡, 电桥输出电压为 0 V , 当 PT100 的电阻值和 R_5 的电阻值不相等时, 电桥不平衡, 此时电桥会输出一个毫伏级的压差信号^[12]。由于测温系统的温度测量范围为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, PT100 的阻值从 $92\text{ }160\text{ }\Omega$ 变化到 $130\text{ }900\text{ }\Omega$, 当 PT100 的阻值为 $92\text{ }160\text{ }\Omega$ 时, 电桥输出电压 $V = 2.045\text{ mV}$; 当 PT100 的阻值为 $130\text{ }900\text{ }\Omega$ 时, 电桥输出电压 $V = 46.691\text{ mV}$ 。根据 A/D 转换器的输入电压范围为 $0 \sim 3.3\text{ V}$, 为了使微小的温度变化对应着尽可能大的电压变化又不超过 ADC 参考电压范围, 由此可以计算出电压放大倍数 $G = 3\text{ }300 / (46.691 - 2.045) \approx 73.91$, 这里取电压放大倍数为 70 , 进而根据运放 INA128 的放大倍数公式 $G = 1 + (50\text{ k}\Omega / R_G)$ 求得 $R_G = 724.64\text{ }\Omega$, 压差信号经运放放大和 RC 滤波后, 才能输送到 16 位的 ADS1110 芯片进行处理, 再由处理过的电压信号计算出 PT100 阻值的大小, 进而得到被测点的温度数据。

1.3 测温系统总体架构

该系统是以 PT100 作为主要测温元件的多点温度监测系统, 实现对温度的多点监控和实时显示^[1]。系统总体结构如图 5 所示, 每个温度采集模块通过蓝牙 Mesh 网络将采集到的温度数据汇总到温度接收模块, 温度接收模块通过串口将数据上传至上位机。

本测温系统主要包括温度采集模块、温度接收模块、无线网络通信模块和上位机 LabVIEW 界面。温度采集模块由 PT100 温度传感器感知温度信号, 采用 16 位高精度低功耗兼容 1°C 的模数转换器 ADS1110 将 PT100 温度传感器输出的温度信号进行采集, 实现对输入模拟信号的模数

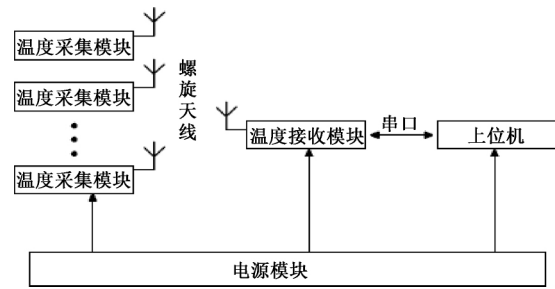


图 5 系统总体结构

转换和温度数据的处理。温度接收模块以蓝牙螺旋天线实现对温度数据的接收, 通过数据总线与上位机串口相连, 并将处理过的温度数据上传至上位机。无线网络通信模块依托蓝牙 Mesh 组网技术, 将温度接收模块与多个温度采集模块进行无线组网, 从而可通过蓝牙螺旋天线接收温度采集模块的温度数据。上位机利用 LabVIEW 搭建温度实时显示界面, 可对温度接收模块传输的温度数据进行曲线显示与数据存储。

2 测温电路硬件设计

温度采集模块和温度接收模块采用相同的电路结构设计, 尺寸均为 $77\text{ mm} \times 47\text{ mm}$, 电路外观如图 6 所示^[13]。

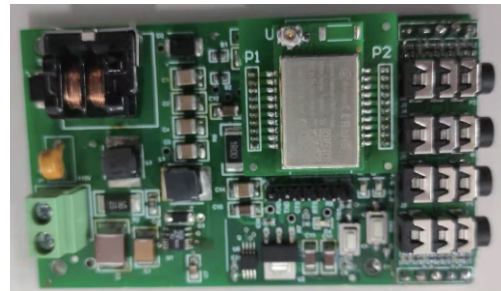


图 6 电路外观

2.1 温度采集模块

温度采集模块实现对温度的实时采集与测量, 并将采集的温度数据通过蓝牙螺旋天线发送至温度接收模块。每个测温节点由 PT100 感知温度信号, 由于 PT100 接入了电桥, 进而会将电阻值的变化转换为微弱电压信号的变化, 信号经过 RC 滤波输入至 ADS1110 的两个模拟差分输入端 VIN+ 和 VIN-, 再经过放大电路的放大和 ADC 的转换, 最终完成温度数据的采集和无线发送^[4]。

为了提高温度数据采集的转换精度和转换速度^[14], 选择 TI 公司生产的 16 位模数转换器 ADS1110, 其电路如图 7 所示, 芯片内含 1 个 2.048 V 的电压基准、1 个时钟晶振、1 个 $\Delta - \Sigma$ 型模数转换器、1 个可编程增益放大器 (PGA)、1 个 I²C 总线接口, 带有差分输入和高达 16 位的分辨率, 片内 2.048 V 的基准电压提供范围为 $-2.048\text{ V} \sim +2.048\text{ V}$ 的输入差分电压^[15], 片内可编程的增益放大器 PGA 提供高达 8 倍的增益。在检测电平较小的情况下, 通

过调节 PGA 单元,可以适当将信号放大,以增加检测精度,实现对微弱信号的采集与处理,具有体积小、低功耗、无噪声等优点。

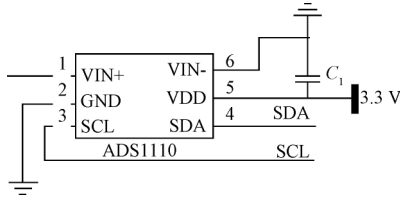


图 7 AD 转换电路

2.2 温度接收模块

温度接收模块是无线测温系统的中间环节,承担着对温度采集模块传输的温度数据的接收,同时将接收到的温度数据经由串口上传至上位机,实时显示在 LabVIEW 界面上。

微处理器芯片是温度接收模块的核心芯片,同时也是整个无线测温系统的核心部分。它具有 Cortex-M4 内核,最高主频高达 180 MHz,工作电压为 3.3 V,集成了 I²C、SPI 等标准通信接口,可以满足无线测温系统对微处理器芯片的要求^[1]。

2.3 无线网络通信模块

无线网络通信模块负责温度采集模块与温度接收模块之间的无线通信和收发采集数据,该模块主要包括蓝牙芯片和螺旋天线。温度采集模块与温度接收模块通过蓝牙螺旋天线实现温度数据的发送与接收。

蓝牙芯片采用塞浦路斯基于蓝牙 5 标准开发的 SOC 模组,内部是 Cortex-M4 处理器架构,具有体积小、功耗低、传输距离远、抗干扰能力强、成本低等优势,专门应用于蓝牙低功耗控制区域,适合于各种场合的短距离无线通信,内部集成了 IPEX 转接器和陶瓷天线,但陶瓷天线难以满足系统对测温模块传输距离的需求,因此设计了一种螺旋天线,该天线具有小型化、高带宽、高增益的特点,最大增益可达 4.6 dB,最远传输距离为 60 m。无线通信电路如图 8 所示。

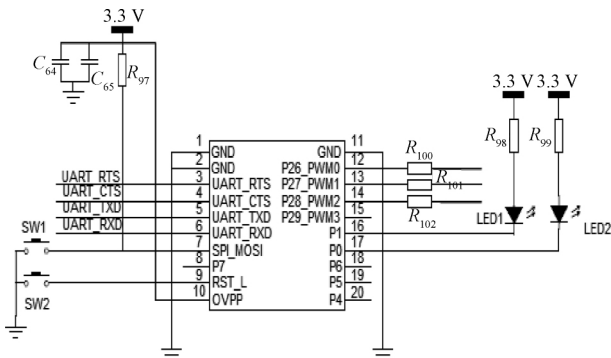


图 8 无线通信电路

3 蓝牙 Mesh 组网

蓝牙 Mesh 组网技术作为一种新型的无线网络技术,

以其低功耗、易组网以及强鲁棒性的特点而得到了广泛的应用。本文中的无线测温系统就是通过手机 APP 在温度采集模块与温度接收模块之间组建蓝牙 Mesh 网络,蓝牙螺旋天线以其高增益的特点扩大了蓝牙 Mesh 网络中节点的传输距离,促使蓝牙 Mesh 网络中的节点可以在大范围的物理区域进行温度数据的交换,从而减少 Mesh 网络中节点的部署。组网过程如下:

1)使用手机 APP 组建蓝牙 Mesh 网络。在建立网络之前,用户需要在手机上开启蓝牙,同时设置网络 ID 和密码。

2)分散布置温度采集模块,保证各温度采集模块与温度接收模块在彼此的扫描范围内,各模块上电以后会进入广播状态,此时用户可以通过观察模块上的 LED 灯闪烁来判断模块是否进入广播状态,当模块进入广播状态以后,会持续广播自身携带的信息。

3)蓝牙 Mesh 网络组建完以后,用户可以通过手机 APP 控制温度接收模块扫描周围待入网模块,扫描范围内的模块会按照扫描得到的 RSSI 值的大小进行排列,用户可以点击模块图标完成相应模块的入网,此时已入网的模块就会成为蓝牙 Mesh 网络的节点。

4)扫描范围内的模块完成入网请求后,已入网的模块会对周围通信范围内尚不在蓝牙 Mesh 网络的模块发起入网邀请,从而完成所有模块的入网过程。

4 上位机软件设计

上位机系统采用 LabVIEW 搭建人机交互的软件界面,系统运行时先出现用户登录模块,用户只有在用户名和密码正确的前提下才能进入数据显示模块,否则继续显示用户登录模块,同时用户也可以在数据显示模块点击退出登录按钮,重新返回到用户登录模块。各模块的关系如图 9 所示。

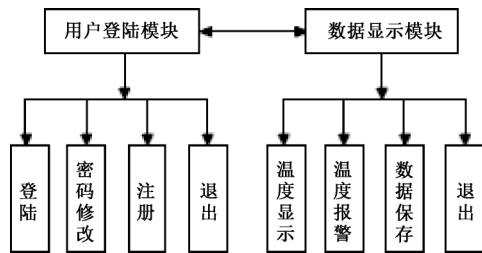


图 9 软件模块关系

4.1 用户登录模块

用户登录模块能够实现用户密码登录、密码修改、用户注册和退出程序。运行界面如图 10 所示。

1)登录功能

用户进入到登录界面时需要输入用户名和密码并点击登录按钮,登录程序会读写本地数据库来查询数据库中的用户名和密码与用户输入的是否相符,若用户输入正确,则会显示用户成功登录的进度条,并且进入数据显示模块;若



图 10 用户登录模块界面

用户名或密码错误,则不能完成用户的登录,而且用户密码输入错误超过 3 次,就会自动退出用户登录模块。登录程序如图 11 所示。

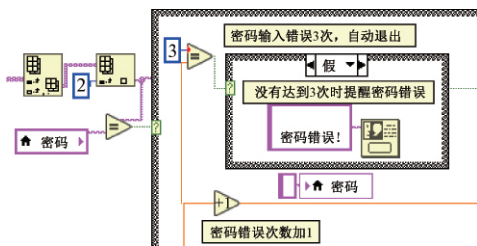


图 11 登陆程序

2) 密码修改功能

用户点击密码修改按钮可以进行密码的修改,在进行用户密码修改时会显示当前用户的用户名,用户输入新密码之后并点击确定按钮,就可以完成用户密码的修改,此时用户再点击返回按钮,就可以重新进行用户的登录。密码修改程序如图 12 所示。

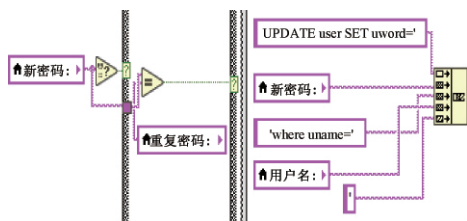


图 12 密码修改程序

3) 注册功能

用户点击注册按钮进行用户名和密码的注册,输入用户名和密码点击确定就完成了用户的注册,此时用户注册的用户名和密码会保存到数据库中;点击返回按钮就可以重新回到登录界面。注册程序如图 13 所示。

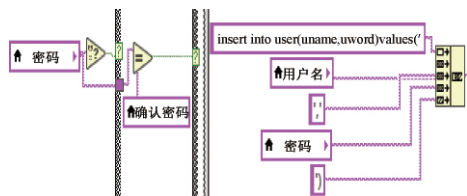


图 13 注册程序

4) 退出功能

用户点击退出按钮就会直接退出程序。

4.2 数据显示模块

数据显示模块用来显示采集的温度曲线、温度超限的报警以及温度数据的保存。运行界面如图 14 所示。

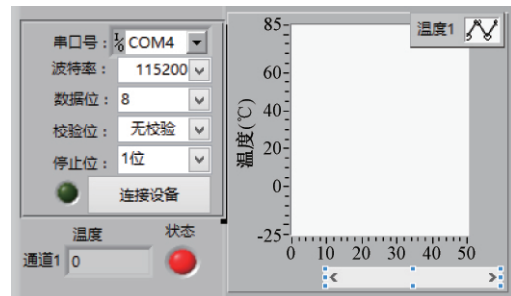


图 14 数据显示模块界面

1) VISA 串口配置

数据显示模块要能正确的显示温度信息,就必须先配置 VISA 串口,VISA 串口的配置包括串口号、波特率、数据位等,VISA 配置串口的波特率与下位机发送数据的波特率必须一致,否则会造成乱码或者无法通信的结果^[3]。VISA 串口程序如图 15 所示。

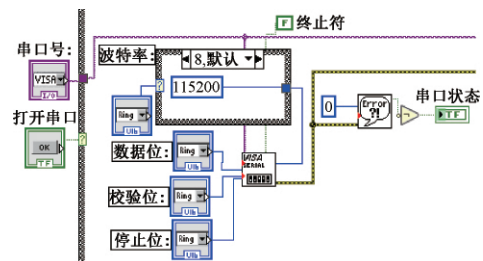


图 15 VISA 串口程序

2) 温度曲线显示

串口读取的是 A/D 转换的数字量,还需要进一步设计程序将数字量转化为对应的温度。在得到 PT100 的电阻值之后,根据不同的电阻值分区采用 LabVIEW 内置的多项式求根函数完成电阻到温度的转换,同时显示在 LabVIEW 界面上。温度显示程序如图 16 所示。

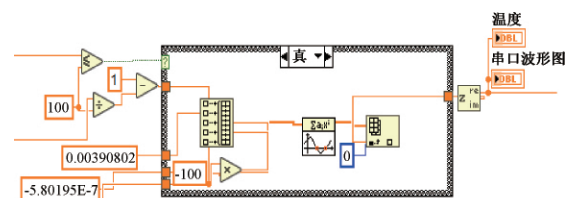


图 16 温度曲线显示程序

3) 温度超限报警

采集到的温度超过用户设置的温度上限或者低于温度下限,都会触发温度指示灯闪烁,同时系统会发出蜂鸣声报警,让用户可以及时采取相应的措施避免意外事故的发生。温度报警程序如图 17 所示。

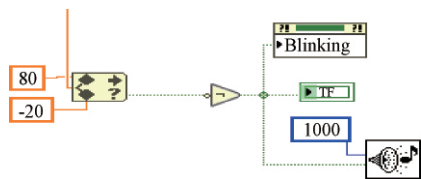


图 17 温度报警程序

4) 温度数据保存

系统在显示温度曲线的同时,还会将温度数据以采集时间与各测温点温度值的形式存储在当前程序所在的位置上,以供用户查询具体的温度信息。温度保存程序如图 18 所示。

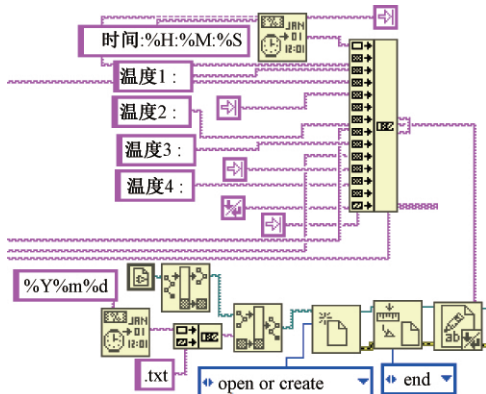


图 18 温度信息保存程序

5 温度测量及标定

5.1 测温实验

为验证无线测温系统的测温精度,搭建如图 19 所示的实验测试环境,测试设备为微型制冷器;标准铂电阻温度传感器测量精度在 $\pm 0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度范围 $-60\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 260\text{ }^{\circ}\text{C}$ [11]。

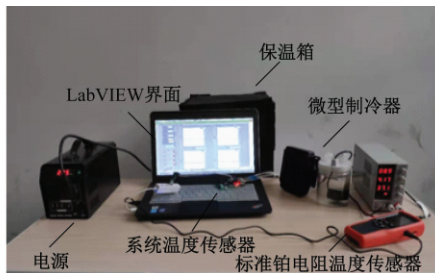


图 19 温度实验测试

由于受实验环境所限,只能将标准温度传感器和本系统的温度传感器同时放置在自制保温箱中,保证两者所测温度为同一值。首先给微型制冷器上电将温度设定在某一温度点,待温度稳定 5 min 后,再给系统上电,同时利用 LabVIEW 上位机保存所测温度值。实验测试过程中,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间每隔 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 设置一个温度点,待达到设定温度点后连续采样 10 次取平均值,得到标准铂电阻温度传感器和本系统温度传感器的平均值,实验数据如表 1 所示。

表 1 标定前测温数据

实际温度/ $^{\circ}\text{C}$	测量电阻/ Ω	测量温度/ $^{\circ}\text{C}$	绝对误差/ $^{\circ}\text{C}$
-20.001	92.642	-18.776	1.225
-10.002	96.436	-9.108	0.894
0.002	100.188	0.480	0.478
9.999	103.903	10.002	0.003
20.001	107.899	20.273	0.272
30.000	111.905	30.602	0.602
40.000	115.919	40.983	0.983
50.000	120.076	51.770	1.770
60.001	124.109	62.267	2.266
70.001	128.151	72.822	2.821
80.000	132.203	83.435	3.435

从表 1 中的实际温度与测量温度的对比以及温度绝对误差可以看出,最大误差有 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,系统测温精度远没有达到 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的精度要求,因此需要对系统进行校准标定。

5.2 提高系统测温精度的方案

引起测温系统误差来源的主要因素有引线电阻、PT100 非线性度、随机信号干扰、元器件的漂移等 [16],为了提高系统的测温精度,本文将基于以上误差来源提出 3 种改进方案。

1) 改善 PT100 接线方式对误差进行补偿

采用四线制接法连接 PT100,为 PT100 提供恒流源,把电阻值转换成电压信号,再通过另外两根导线把电压信号引至测量端。这样可以完全消除引线电阻的影响,减小测量误差,进一步提高测量精度。

2) 对采样信号进行滤波减小随机误差

外界随机信号的干扰促使温度采样值偏离真实值,造成一些随机误差,因此可以通过数字滤波的方式对温度采样值进行滤波处理 [17],常用的数字滤波方法有中值滤波、算术平均滤波、加权平均滤波、去极值平均滤波、滑动平均滤波等。

3) 最小二乘法拟合校正 PT100 的非线性度

采用查表法、线性插值法或最小二乘法拟合,都可以获得高精度的温度测量值,但查表法需要建立大量的表格,占用很大的存储空间;最小二乘法拟合不仅运算快、占用存储空间少,而且可以在一定程度上对 PT100 进行线性化校正,从而达到非常精确的测温效果。

5.3 线性拟合标定

由于铂电阻 PT100 的自身精度以及电路中元器件的漂移,导致测量温度和实际温度会存在一定偏差。为了使测温结果更加精确,采用数字滤波和最小二乘法拟合相结合的方法进行温度标定 [18],该方法先利用数字滤波对采样值过滤,减少随机误差,得到初步的温度采样值,再利用最

小二乘法对温度数据进行分段线性拟合,得到不同温度区间上的温度—电阻变换表达式,以进一步提高测温精度,使其满足实际应用的需求。

1) 数字滤波

在进行温度数据采集和传输过程中,容易受到外界随机信号的干扰,因此采用去极值平均滤波来抑制采集数据中的噪声。对同一温度点对应的电压采样值,连续采样 10 个数据,将采样数据中的最大值和最小值去除^[12],同时对剩余的 8 个数据累加求平均,得到最终温度点的采样值,从而使采样值更接近真实值。

2) 最小二乘法拟合

系统测量温度由电桥公式和铂电阻阻值-温度关系转化而来,但在转化的过程中,精密电阻的阻值在一定程度上可能存在误差,以及元器件的温漂和滤波电阻等的影响,都会造成铂电阻的阻值偏差,进而影响系统所测得的温度,因此使用最小二乘法拟合的方法对 A/D 芯片采集计算出的 PT100 阻值与温度进行拟合标定。

由于对测温精度的要求较高,若直接对全部温度数据进行线性拟合,会导致部分温度区间内精度降低,因此在拟合的过程中将测温区间 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 划分为 10 个区间段,然后分别对每一区间段线性拟合,得到各温度区间段拟合函数表达式如下:

$$\left\{ \begin{array}{ll} T_1 = 2.4922R - 250.8487, & -20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -10\text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_2 = 2.6654R - 267.0510, & -10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_3 = 2.5098R - 250.7711, & 0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_4 = 2.5025R - 250.0199, & 10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_5 = 2.4960R - 249.3174, & 20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_6 = 2.4910R - 248.7539, & 30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_7 = 2.3824R - 236.1607, & 40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_8 = 2.4794R - 247.7200, & 50\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_9 = 2.4740R - 247.0407, & 60\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{10} = 2.4680R - 246.2769, & 70\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C} \end{array} \right.$$

将拟合得到的关系式写入到 LabVIEW 上位机中,然后验证拟合方法对系统测温精度的标定效果。

5.4 测温系统应用

利用设计的多点无线测温系统,对大学实验室的仪器设备进行温度监测。首先选取需要监测温度的仪器设备,然后分别将温度采集模块安装在需要测温的仪器设备上,测温探头可测量仪器设备的内部温度,温度接收模块通过蓝牙 Mesh 网络接收来自温度采集模块的温度数据,同时上位机可以将各个测温点的温度数据分离并以曲线和数字两种形式分别显示当前仪器设备测温点的温度数值。上位机记录 1 天的温度数据,温度采集模块每隔 1 s 将采集到的温度数据发送至温度接收模块,在实验过程中,如果所测仪器设备的温度超过设定的温度上下限,蜂鸣器就会报警,实验人员就可以及时采取措施降低损失。以仪器设备单个测温点的实验数据为例,每隔 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 选取一个测温点,测温数据如表 2 所示。

表 2 标定后测温数据

实际温度/ $^{\circ}\text{C}$	测量电阻/ Ω	测量温度/ $^{\circ}\text{C}$	绝对误差/ $^{\circ}\text{C}$
-20.003	92.645	-19.959	0.044
-10.002	96.440	-10.000	0.016
0.001	100.186	-0.015	0.010
10.000	103.905	10.010	0.010
20.001	107.897	19.992	0.009
30.000	111.908	30.005	0.005
39.999	115.917	39.995	0.004
50.001	120.075	49.911	0.090
60.001	124.109	59.995	0.006
70.000	128.152	70.007	0.007
80.001	132.200	79.993	0.008

由表 2 可知,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测温范围内,线性拟合的温度误差最大值为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,拟合标定后的温度误差降低了很多,已经完全满足系统 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测温精度。

6 结 论

本文简要介绍了铂热电阻 PT100 的特性以及测温原理,在此基础上阐述了基于蓝牙 Mesh 组网的测温系统的设计。本测温系统采用三线制铂热电阻电桥测温电路,通过对电路的设计,减小了测量电路及 PT100 自身的误差,使温控精度在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内达到 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时在上位机 LabVIEW 软件实时显示、保存测温节点的温度数据,能够满足分散节点的多点温度监测,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 周旋,师蔚.低功耗高精度温度多路采集测温系统研究[J].电子科技,2020,33(8):46-52.
- [2] 苏振中,王东,陈俊全,等.基于 XTR105 的多通道温度测量系统[J].仪表技术与传感器,2012(8):59-62.
- [3] 刘钢.基于 LabVIEW 和 ZigBee 技术的无线测温装置设计[D].合肥:安徽大学,2016.
- [4] 骆丽,杨永刚,胡文涛,等.基于 Pt100 的高精度测温电路[J].北京交通大学学报,2017,41(5):52-57.
- [5] 李加超,孟令军,张晓春.基于 ARM 的高精度测温系统设计与实现[J].自动化与仪表,2014,29(10):16-19.
- [6] YANG G, WEN Y. A controllable DCCS based PT temperature sensor in high precision molecular spectroscopy Application[J]. IEEE Access, 2020(99): 1-1.
- [7] 徐莉振,鲍敏.面向 Pt100 铂电阻的高精度多路测温系统[J].机电工程,2013,30(1):65-68,72.

- [8] 邓友,丁卫撑,陈浩峰.基于传递函数法的 PT100 的高精度测温设计[J].电子测量技术,2015,38(12):92-95.
- [9] 张瑜,张升伟.基于铂电阻传感器的高精度温度检测系统设计[J].传感技术学报,2010,23(3):311-314.
- [10] 王冠,陈建魁,翟洁,等.基于放大器和温度传感器的温度采集方案[J].仪表技术与传感器,2014(11):66-69.
- [11] 吴鹏,罗松.基于地震前兆监测的温度测量装置的研究[J].电子器件,2019,42(5):1314-1319.
- [12] 严长城,应贵平.基于 PT100 铂热电阻的高精度测温系统的设计[J].机电工程技术,2015,44(3):71-74.
- [13] 金忠,文海,陈云锋,等.基于总线的温度传感网络采集系统设计[J].国外电子测量技术,2020,39(7):99-103.
- [14] 刘世超,王安敏,王金龙,等.高精度密炼机混炼温度智能控制系统设计[J].计算机与数字工程,2019,47(2):465-470.
- [15] 陈征,刘开华.基于 MSP430 的多用便携式测量仪的设计[J].电子测量技术,2012,35(5):36-39.
- [16] 郑泽祥,姜周曙,黄国辉,等.铂电阻高精度温度测量系统设计[J].机电工程,2013,30(12):1494-1497,1502.
- [17] 凌菁,滕召胜,张凯旋.基于 Pt100 的红外干燥箱动态温度补偿方法研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(4):542-549.
- [18] 周鹏程,王志.基于铂电阻多测点温度测量系统及其应用[J].传感器与微系统,2019,38(6):158-160.

作者简介

陈鸿海,硕士研究生,主要研究方向为无线通信。

E-mail:2065246277@qq.com

赵鹤鸣(通信作者),教授,博士生导师,主要研究方向为语音分析和处理、智能计算、数字信号处理系统。

邵雷,高级实验师,主要研究方向为信号与信息系统、嵌入式系统、弱信号提取、物联网等。

E-mail:shaolei@suda.edu.cn