



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

电子系统设计

实验报告

班级：_____XXXX_____

姓名：_____XXXX_____

学号：_____XXXXXXXXXX_____

温度测量与控制系统设计

一、设计要求

1. 设计实现温度测量与控制系统，测温与控温范围为室温至 100℃。要求测温误差小于 1℃，控温误差小于 2℃。
2. 被控对象为电热杯，执行元件为继电器，测温元件为铂热电阻 Pt100。
3. 在数码管或液晶屏上显示实测温度值与设定温度值。

二、系统方案设计

1. 系统总体框图

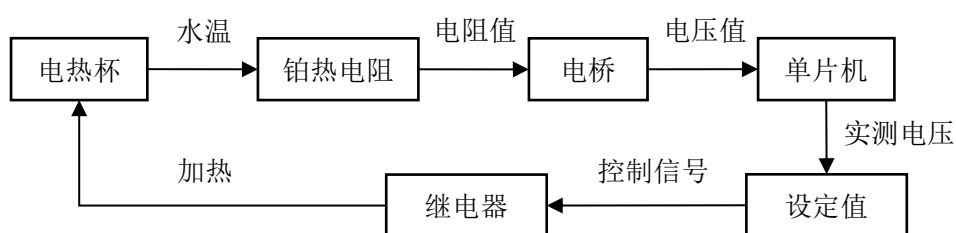


图 1 系统总体框图

2. 各模块方案设计

(1) 温度传感器

本实验中采用铂热电阻作为温度传感器。铂热电阻的特点是精度高、稳定性好、性能可靠，所以在温度传感器中得到了广泛的应用。铂热电阻的使用温度范围为-200~850℃，其特性方程为：

-200~0℃ 范围内

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)] \quad (1)$$

0~850℃ 温度范围内

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

其中， $A = 3.90802 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ ， $B = -5.802 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}^2$ ， $C = -4.27350 \times 10^{-12} / ^\circ\text{C}^4$ 。

铂热电阻的温度特性曲线如图 1 所示。在本实验的测温范围中，温度曲线近似为一条直线，因此可以考虑将铂热电阻的温度特性近似为一条直线。

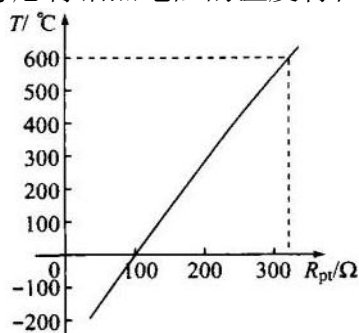


图 1 铂热电阻温度特性曲线

(2) 电桥电路

电桥电路是将电阻的变化转换为电压变化的物理量。当电流流经铂热电阻时，电阻自身也会发热，从而导致所测温度比实际值偏高。为了避免铂热电阻自身发热导致的测温误差，要求电流值减小，在 1mA 左右较为合适。这样，需要将铂热电阻与一个大电阻串联以减小电流值。

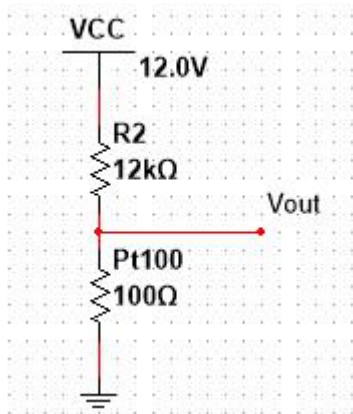


图 2 电阻分压电路

图 2 和图 3 所示电路均可实现将电阻的变化转换为电压的变化。然而，使用图 2 电路存在一个问题，此电路的输出电压为 $V_{out} = \frac{Pt100}{R2 + Pt100} V_{cc}$ ，当温度从 0℃ 升高到 100℃ 时，输出电压的变化量仅为 -0.039V。由于输出电压的变化量非常小，使得实际测量十分困难，且测量精度会相当低。此外，若采用此电路，输出电压与温度的变化不是线性关系。

在测量系统中，一般被测量者的状态量是非常微弱的，必须用专门的电路来测量这种微弱的变化，最常用的电路就是各种电桥电路。在此实验中，我们选择如图 3 所示的直流电桥来把电阻的变化量转换为电压的变化量，下面进行参数的计算。

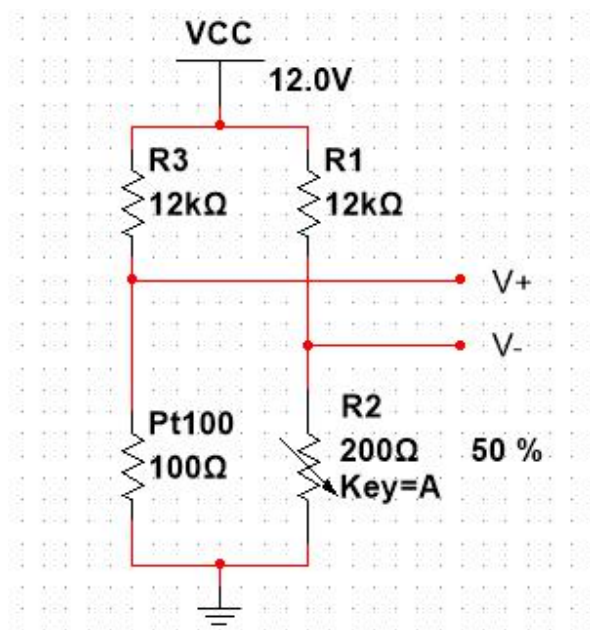


图 3 直流电桥电路

电桥输出端电压表达式分别为：

$$V_+ = \frac{Pt100}{Pt100 + R3} \times V_{cc} \quad (3)$$

$$V_- = \frac{R2}{R2 + R1} \times V_{cc} \quad (4)$$

输出差分信号为：

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_+ - V_- \\ &= \frac{Pt(R1 + R2) - R2(Pt + R3)}{(Pt + R3)(R1 + R2)} V_{cc} \\ &= \frac{R1(Pt - R2)}{(Pt + R3)(R1 + R2)} V_{cc} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 R2 为调零电阻，由于所测温度最低为室温，且实验室没有制冷设备，故室温以下的温度范围是达不到的，因此我们通过调整 R2 来将室温时的输出差分电压调整为 0V。

采用此电路得到的温度变化与电压的关系仍然为非线性的，若采用单片机处理，会使得计算复杂，因此我们采用近似的方法将其线性化。线性化过程分为两步，第一，由于 Pt 与 R2 的阻值相差不多，因此可将 Pt 近似为与 R2 相等，这样，得到的差分电压与铂热电阻阻值的关系为：

$$\Delta V = \frac{R1(Pt - R2)}{(R1 + R2)^2} V_{cc} \quad (6)$$

第二，铂热电阻的温度特性也不是线性的，代入 A、B、C 的值可得在 0-850℃ 温度范围内其阻值与温度的对应关系为：

$$R_t = R_0[1 + 3.90802 \times 10^{-3}t - 5.802 \times 10^{-7}t^2] \quad (7)$$

若舍弃表达式中的平方项，当温度为 100℃ 时，带来的误差仅为 -0.5802℃，在对精度要求不高的情况下，可以省略平方项。

综上，得到的环境温度与电桥输出差分电压的对应关系如下，且温度 t 与 ΔV 之间呈线性关系。

$$t = \frac{\Delta V(R1 + R2)^2}{R0 \cdot R1 \cdot A \cdot V_{cc}} - \frac{R2 - R0}{R0 \cdot A} \quad (8)$$

(3) 直流放大电路

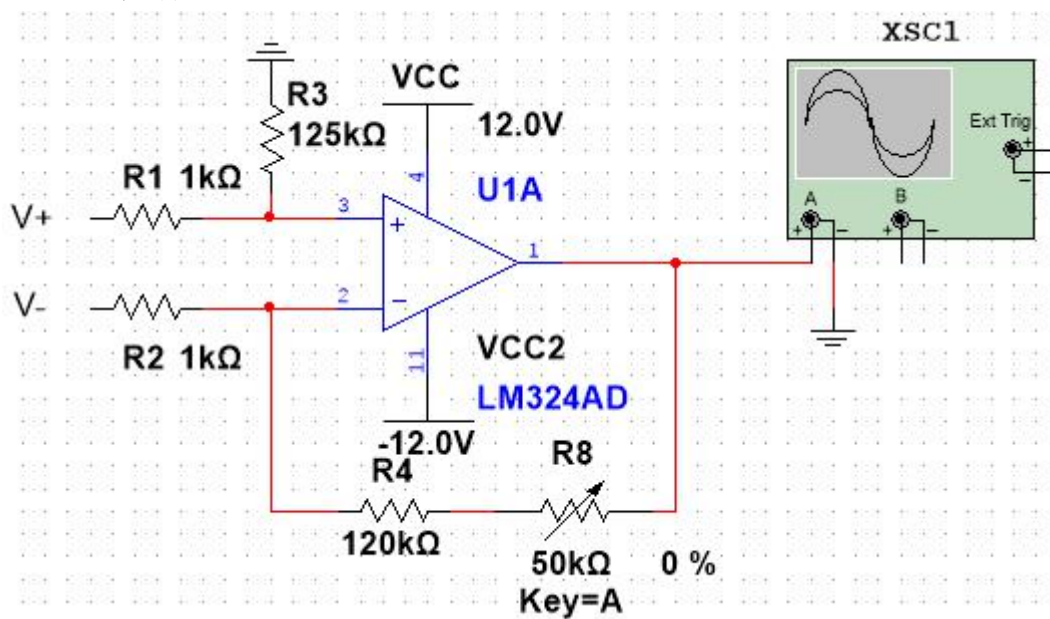


图 4 直流放大电路图

如图 4 所示为直流放大电路，由式 (6) 估计得，100℃时，电桥输出的差分电压约为 40mV。为了将 100℃时的差分电压放大到单片机所能测量的最大值 5V，应放大约 125 倍。

下面利用“虚短”、“虚断”对电路的放大倍数进行计算。设运放同相输入端为 V_3 ，反相输入端为 V_2 ，输出端为 V_0 ，则由“虚短”得

$$\frac{V_0 - V_2}{R4 + R8} = \frac{V_2 - V_-}{R2} \quad (9)$$

$$\frac{V_+ - V_3}{R1} = \frac{V_3}{R3} \quad (10)$$

由“虚断”得

$$V_2 = V_3 \quad (11)$$

由以上三式可得

$$V_0 = \frac{R4 + R8}{R2} \left[\left(1 + \frac{R2}{R4 + R8} \right) \frac{R3}{R1 + R3} V_+ - V_- \right] \quad (12)$$

由于 $\frac{R2}{R4 + R8} \approx 0$ ， $\frac{R3}{R1 + R3} \approx 1$ ，故可简化为

$$V_0 \approx \frac{R4 + R8}{R2} (V_+ - V_-) = \frac{R4 + R8}{R2} \Delta V \quad (13)$$

在此电路中，R8 的作用是调满。即在环境温度为 100℃时，若 ΔV 不是 5V，则可调节电位器 R8 使得 100℃时对应满量程。

(4) 基于单片机的温度测量与控制算法

温度的测量主要涉及 ADC 外设，首先，放大电路输出的差分电压作为模拟电压量输入到 ADC 模块，ADC 模块完成采样、保持、量化、编码等过程，将模拟量

转化成相应的数字量。接着，单片机根据采样电压值计算当前温度，并实现相应的显示。

温度的控制主要是由单片机输出 PWM 波控制继电器通断实现的。单片机通过实测温度与设定温度的差值来改变输出给继电器的 PWM 波的占空比，即可改变继电器的通断时间，从而改变电热杯的加热时间。

在控温过程中需要注意的问题有两个，一是过程中可能出现超调、抖动等问题。对此，应使用 PID 算法来进行温度控制。在实际实验过程中，需要根据实际测量情况来调节 P、I、D 参数，使得系统工作在超调量小且调节速度快的最佳状态。二是温度-电压曲线实际上是非线性的，只不过为方便测量和计算，人为将其看成了线性的。若采用线性处理时不能达到测温 and 控温要求，应采取一些别的处理方法，如进行非线性补偿。

三、测试方案与结果

1. 测试方案

- (1) 按照电路图连接电路。
- (2) 将加热杯装入适量水，与继电器、插座依次连接好，并将继电器信号端与单片机 PWM 输出端相连。
- (3) 将铂热电阻和标准温度测量仪器放入水中。
- (4) 接通直流电源，用万用表测量室温下电桥输出的差分电压，调节电桥中的电位器，使得输出电压为 0。
- (5) 接通交流电，加热使水沸腾，根据 100℃ 时对应满量程，计算出沸腾温度对应的电压，并调节放大器处的电位器使实际电压值与该值相等。
- (6) 给单片机设置一个温度，开启温度测量控制过程，并与标准温度对比。通过反复调整 PID 参数来获得最佳精度。

2. 测试结果

经实际测量，温度测量误差为 1℃，温度控制误差为 1.5℃。

四、小结

通过本次温度测量与控制电子系统设计实验，掌握了将被测温度转化为电压的方法、温度-电压关系式的线性化处理、利用 PID 算法实现温度控制等知识。此外，对于测量类系统的调零、调满、非线性处理等问题有了进一步了解。