

实验 A4 温度传感器温度特性的测量

[实验前思考题]

1. 温度传感技术的基本思想是什么？查阅资料，列举尽可能多的温度传感器的类型，只要求写出名称。

2. 热敏电阻的什么特性决定它可以用来测温？

1. 用物质某性质随温度变化规律间接测量。

类型：金属电阻温度传感器、热敏电阻温度传感器、热电偶温度传感器、电压型集成电路温度传感器、电流型集成电路温度传感器、石英晶体温度计、红外温度计、光学高温计、光电高温计、辐射高温计。

2. 热敏电阻由半导体材料制成，阻值随[✓]温度改变。

负温度系数电阻阻值随温度升高而下降

正温度系数电阻阻值随温度升高而上升

(请自行加页)

**1 实验目的**

1. 了解温度传感器的原理与应用。
2. 测量铂金属电阻 PT100、铜金属电阻 Cu50、PN 结、正温度系数热敏电阻 (PTC)、负温度系数热敏电阻 (NTC)、热电偶、LM35 型、AD590 型等八种典型温度传感器的温度特性。

2 仪器用具

仪器名称	数量	主要参数 (型号, 测量范围, 测量精度等)
智能型制冷/加热温度控制仪	1	HJK-100
直流稳压稳流电源	1	JK-31
数字万用表	1	DM3051
LCR Meter	1	TH 2811D
温度传感器	8	铜金属电阻 Cu50、PN 结、热敏电阻温度
导线	若干	

3 原理概述

温度传感器是利用一些金属、半导体等材料与温度相关的特性制成的。常用的温度传感器的类型、测温范围和特点请翻阅教材的 § 6.2 节-温度计。本实验将通过测量几种常用的温度传感器的特征物理量随温度的变化, 来学习这些传感器的工作原理。

3.1 金属电阻温度传感器

金属电阻温度传感器利用金属电阻的阻值随温度的升高而增大的特性设计和制作, 这里以 Cu50 铜电阻温度传感器为例加以说明。铜电阻常用于 -50°C - 150°C 范围的温度测量, 其电阻 R_t 随温度 t 变化的函数可写为

$$\begin{cases} R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3) \\ A = 4.28899 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}, B = -2.133 \times 10^{-7}^{\circ}\text{C}^{-2}, C = 1.233 \times 10^{-9}^{\circ}\text{C}^{-3} \end{cases} \quad (1)$$

其中 R_0 为 0°C 时的电阻。 0°C 时, $\text{Cu100}=100\Omega$, $\text{Cu50}=50\Omega$, 允许不确定度为 $\pm(0.30+0.006|t|)$ 。 Cu50 应用最广。在温度变化不大的情况下, 可只取线性项, 即

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

其中, A 称为 Cu50 的电阻温度系数。

3.2 热敏电阻温度传感器

热敏电阻由半导体材料制成, 其特点温度系数大, 常温下电阻值高, 通常在几千 Ω



以上。但由于其非线性大，置换性差，稳定性差，多用于测温精度要求不高的场合。热敏电阻有两种类型，一种是电阻值随温度的升高而下降，称为负温度系数热敏电阻（简称“NTC”元件）；另一种是电阻值随温度的升高而增大，称为正温度系数热敏电阻（简称“PTC”元件）。两种电阻的电阻率 ρ_T 随热力学温度 T 的变化关系可写为

$$\begin{cases} \text{NTC: } \rho_T = A_0 e^{B/T} \\ \text{PTC: } \rho_T = A' e^{B_p/T} \end{cases} \quad (3)$$

式中 A_0 、 B 、 A' 、 B_p 为常数，由材料的物理性质决定。对于 NTC 材料，将式 (3) 两边取对数，有：

$$\ln \rho_T = B \cdot \frac{1}{T} + \ln A_0 \quad (4)$$

可见， $\ln \rho_T$ 与 $1/T$ 成线性关系，作 $\ln \rho_T \sim (1/T)$ 关系曲线，用直线拟合可求出常数 B 和 A_0 。

3. 热电偶温度传感器

热电偶(thermocouple)亦称为温差电偶，是由 A、B 两种不同材料的导体的端点彼此紧密接触而组成的。若两个接点的温度不同，回路中会产生直流电动势 E_x ，该电动势称为温差电动势或热电动势，这种效应称为热电效应。 E_x 为两接点处温度的某种函数之差，

$$E_x = f(t) - f(t_0) \quad (5)$$

E_x 仅与两种导体的材料和两接点处的温度有关，而与导体的粗细、长短及两种导体的接触面积无关。 E_x 和两接点的温度差 $\Delta t = (t - t_0)$ 一般是非线性的，但温差不大时，可近似满足线性关系

$$E_x \approx \alpha(t - t_0) \quad (6)$$

式中 α 称为温差电系数，不同导体组成的热电偶，其 α 不同。实验室常用的一种铜-铜镍（也称为铜-康铜）热电偶在 $\Delta t = 100^\circ\text{C}$ 时的 E_x 约为 4.3 mV，该信号可用灵敏度为 0.001mV 的 5-1/2 位数字万用表直接测量。

4. PN 结温度传感器：

PN 结温度传感器是利用半导体 PN 结的结电压对温度的依赖关系设计和制作的。在一定的工作电流下，PN 结的正向电压与温度之间有良好的线性关系。通常将硅三极管基极 b、集电极 c 短路，用 b、发射极 e 之间的 PN 结作为温度传感器。硅三极管 b、e



极间正向导通电压 U_{ge} 约为 600mV(25°C)，且与温度成反比。线性良好，温度系数约 $-2.3\text{mV}/^\circ\text{C}$ ，测温范围可达 $-50^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 。

在 PN 结正向电流 I 保持恒定的条件下，正向电压 U 和温度 t 近似满足下列线性关系

$$U = K \cdot t + U_{g0} \quad (7)$$

其中 U_{g0} 为半导体材料参数， K 为 PN 结的结电压温度系数。

5. 电压型集成电路温度传感器（LM35）

LM35 温度传感器是一种电压型集成电路温度传感器，其输出电压大小与温度成正比，准确度一般为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，输出电压的温度系数 $K_V = 10.0\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。由于其输出为电压且线性极好，只要配上电压源、数字式电压表就可以构成一个精密数字测温系统。内部的激光校准保证了极高的准确度及一致性。利用下式可由输出电压直接算出被测温度

$$t(^{\circ}\text{C}) = U_0 / 10\text{mV} \quad (8)$$

LM35 温度传感器的电路符号如图 1 所示，其中 V_0 为输出端。

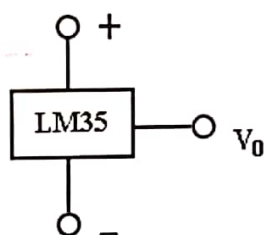


图 1 LM35 电路符号

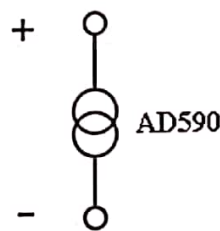


图 2 AD590 电路符号

6. 电流型集成电路温度传感器（AD590）：

AD590 是一种电流型集成电路温度传感器，其输出电流大小与温度成正比，线性度极好。测温范围为 $-55 \sim 150^\circ\text{C}$ ，准确度 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ ，输出电流的温度系数 $K_I = 1.0 \mu\text{A}/\text{K}$ 。

AD590 等效于一个高阻抗的恒流源，其输出阻抗 $> 10\text{M}\Omega$ ，能大大减小因电源电压变动而产生的测温误差。利用下式可由输出电流直接算出被测温度

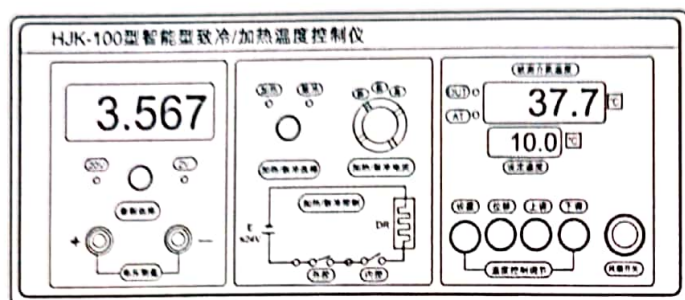
$$T(\text{K}) = I / 1\mu\text{A} \quad (9)$$

故测温范围内其输出电流为几百 μA 量级。AD590 温度传感器的电路符号如图 1 所示。

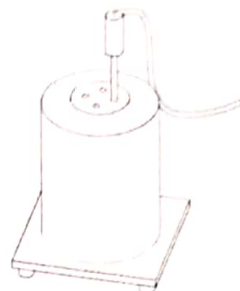


| 实验装置 |

1. 温度控制设备



(a) 致冷/加热温度控制仪



(b) 控温阱及传感器

图 3 致冷/加热温度控制设备

(a) 为致冷/加热温度控制仪器，从左到右分成三个部分，一为电压表，有 20V 和 2V 两个量程；二为加热和致冷功率控制器，加热/致冷选择按钮可选择致冷井工作还是加热井工作，相应的指示灯会点亮，功率有三档，0、低功率、高功率。加热和致冷过程中，先选择低功率档，当温度变化较缓慢的时候选择高功率档。三为温度设置和测量装置，用温度控制调节部分的四个按钮设置温度值，实际的温度由“被测介质温度表”读出，风扇用于加快空气流动，进而加快降温或升温的过程。

(b) 控温阱分为致冷阱和加热阱两种。制冷阱用于 0℃ 至室温范围的实验，加热阱用于室温-100℃ 范围。两个工作阱通过电缆与温度控制仪后面板上的专用端口连接。顶部圆孔可插温度传感器。

注意： 温控仪温度达到设定值并稳定需时约 10-15min，实验过程中需耐心等待。

2. 被测温度传感器

有 8 种传感器，全部封装在金属保护管中，可插入加热井和致冷井中。传感器的类型标注在保护管的外壳上。本实验只使用其中的三种。

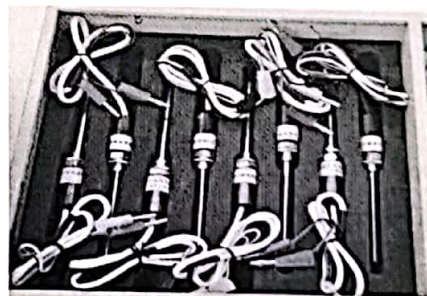


图 4 被测温度传感器

3. 传感器测量设备



图 5 JK-31 型直流稳压稳流电源

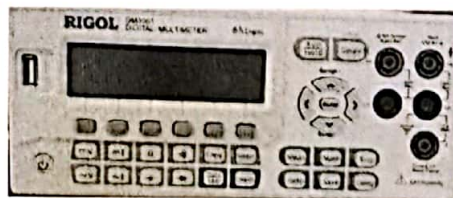


图 6 DM3051 型数字万用表



图 7 TH2811D 型 LCR Meter

直流稳压稳流电源提供了三组电源，一个是 0-30V 连续可调的稳压电源，一个是 0-250mA 连续可调的稳流电源，第三个为集成电路工作电源，输出电压为 $\pm(3.3, 5, 8, 12, 15)V$ 。DM3051 数字万用表，TH2811D 型 LCR Meter 的使用方法请查阅教材。

【实验内容及步骤】

一、测量 Cu50 金属电阻、NTC 热敏电阻、PN 结温度传感器等三种传感器的温度特性。

1. 连线

(1) 致冷井和加热井分别用电缆与温度控制仪后面板的专用端口连接。

(2) 将上述三种温度传感器分别插入致冷井的测量孔，TH2811D 型 LCR Meter 接 Cu50 温度传感器，DM3051 数字万用表接 NTC 温度传感器；PN 结温度传感器按图 8 电路连线，其中 5V 电源由 JK-31 型直流稳压电源提供，数字式电压表由温度控制

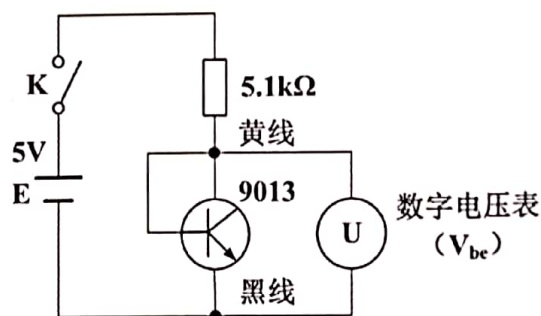


图 8 PN 结温度传感器工作电路图

压表的电压测量功能来实现。

2. 开机，先让制冷井工作，温度设置为 0°C ，制冷电流选择“高”，让致冷井降至 0°C 。

3. 测量。从 $0^{\circ}\text{C} \rightarrow 100^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C}$ 完成一次温度循环，每隔 5°C 或 10°C 测量 Cu50 和 NTC 传感器的电阻 R_{Cu} 和 R_{NTC} ，测量 PN 结温度传感器的输出电压 U_{be} 。

注意：(1) 当“致冷井”的温度升至室温后需将传感器转移至“加热井”继续升温。

(2) 加热井的加热电流先选择“低”，等温度上升比较缓慢时再改用“高”。从 100°C 开始降温时先选择“低”，等温度下降比较缓慢后再选择“断”。避免升温和降温速度太快，来不及记录数据。



4. 数据处理要求

- (1) 作出 Cu50 和 NTC 传感器电阻随温度变化的关系曲线, 并用最小二乘法拟合。
- (2) 根据 $R_{Cu} - T$ 关系曲线, 结合式 (2), 求 Cu50 传感器的电阻温度系数 A 。
- (3) 对于 NTC 传感器, 计算 T^{-1} (T 为热力学温度) 及 $\ln R_{NTC}$, 根据式 (4) 用最小二乘法直线拟合, 求 B 和 A_0 。
- (4) 作 PN 结温度传感器输出电压 U_{be} 随温度 T 变化的关系曲线并拟合。



2. 数据处理

(1) 作 Cu50 的 $R_{Cu} \sim t(^{\circ}\text{C})$ 关系曲线并拟合求出电阻温度系数 A 。要求写出最小二乘法拟合的中间过程，而不是用数据处理软件直接得出结果。

$$\bar{T} = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} T_i = 57.5^{\circ}\text{C} \quad \text{设 } R_{Cu} = at + b.$$

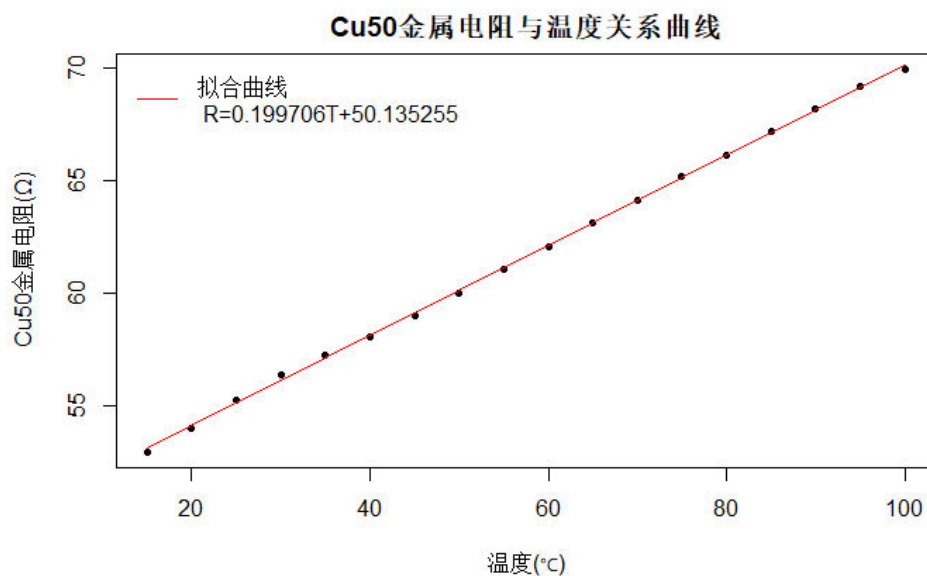
$$\bar{R} = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} R_i = 61.61836 \Omega$$

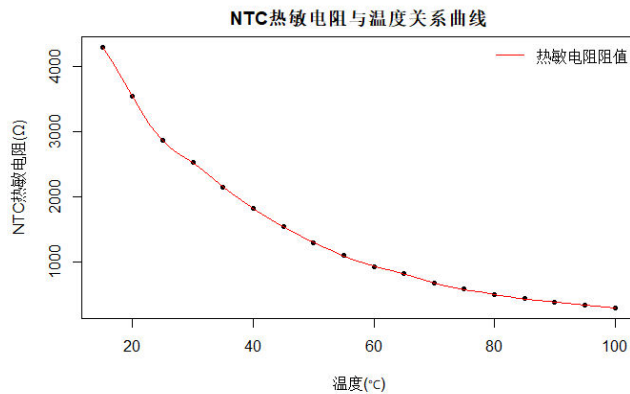
$$\overline{T \cdot R} = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} T_i \cdot R_i = 3677.441^{\circ}\text{C} \cdot \Omega$$

$$\bar{T}^2 = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} T_i^2 = 3979.167^{\circ}\text{C}^2$$

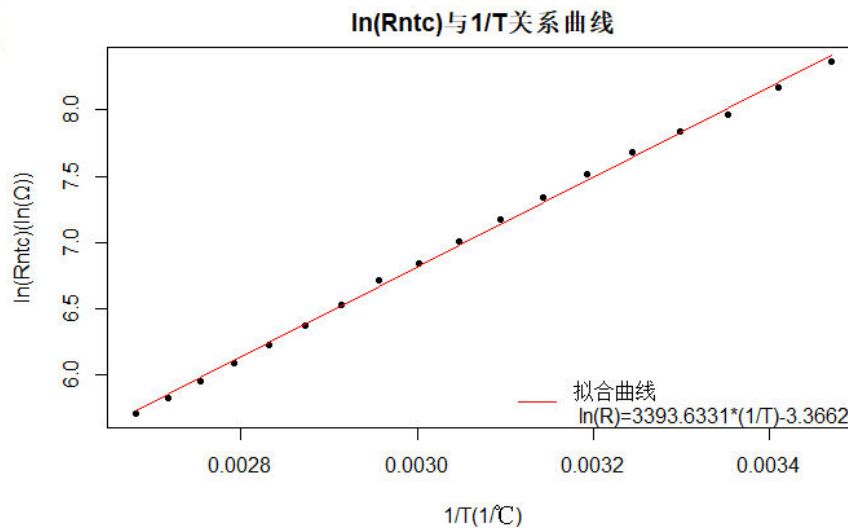
$$a = \frac{\overline{T \cdot R} - \bar{T} \cdot \bar{R}}{\bar{T}^2 - \bar{T}} = 0.1997062 \Omega/^{\circ}\text{C}$$

$$b = \bar{R} - a\bar{T} = 50.13526 \Omega$$



(2) 作 NTC 的 $R_{NTC} \sim t(^{\circ}\text{C})$ 关系曲线

(3) 列表写出 $1/T$ 和 $\ln R_{NTC}$ 的数值, 并作 $\ln R_{NTC} \sim 1/T$ 关系曲线, 用最小二乘法拟合求常数 B 和 A_0 。可数据处理软件拟合。

 $1/T$ 与 $\ln(R_{ntc})$ 值的列表

```
[1] 0.003470415 0.003411223 0.003354016 0.003298697 0.003245173 0.003193358 0.003143171
0.003094538
[9] 0.003047387 0.003001651 0.002957267 0.002914177 0.002872325 0.002831658 0.002792126
0.002753683
[17] 0.002716284 0.002679887
[1] 8.367428 8.173716 7.960603 7.837337 7.676705 7.510732 7.341743 7.173575 7.005925 6.841615
6.715626
[12] 6.524296 6.371612 6.226635 6.085751 5.951033 5.826000 5.711420
```



(4) 作 PN 结温度传感器的 U_{be} (mV)~ t (°C) 关系曲线, 并根据式 (7) 拟合求出电压温度系数 K 。

$$\text{设 } U = at + b.$$

$$\bar{T} = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} T_i = 57.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

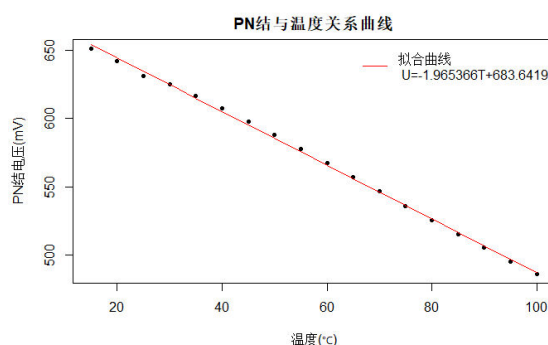
$$\bar{U} = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} U_i = 570.6333 \text{ mV}$$

$$\overline{T \cdot U} = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} T_i U_i = 31488.89 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{mV}$$

$$\bar{T}^2 = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} T_i^2 = 3979.167 \text{ } ^\circ\text{C}^2$$

$$a = \frac{\overline{T \cdot U} - \bar{T} \bar{U}}{\bar{T}^2 - \bar{T}^2} = -1.965366 \text{ mV/}^\circ\text{C}.$$

$$b = \bar{U} - a \bar{T} = 683.6419 \text{ mV}$$

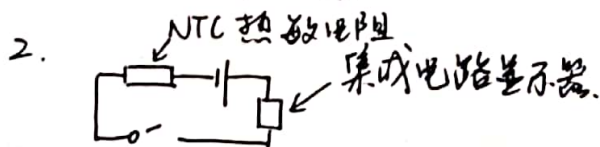


【实验后思考题】

1. 利用最小二乘法拟合铜电阻的 $R_{Cu} \sim t$ 曲线来求出电阻温度系数 A , 与作图法(直接在直线上取两点进行计算)得到的 A 值作比较, 说明哪种方法得到的 A 值更合理。

2. 如何利用热敏电阻的电阻温特性设计测温仪器? 试写出该温度计的结构。

1. 利用最小二乘法拟合更合理, 因为这种方法用到了更多的数据, 减小了随机误差



集成电路可测出电路中的电流, 计算出热敏电阻 R , 利用 $\ln R$ 与温度 T 的线性关系求得温度。