

普通物理学实验 II

电子实验报告

实验名称: 热敏电阻和热电偶温度特性研究

指导教师: 张利

班级: 化学(求是科学班) 2301

姓名: 吴瑞

学号: 3230103102

实验日期: 2024 年 11 月 20 日 星期三 下午

浙江大学物理实验教学中心

一、实验综述

（一）实验背景

热敏电阻是一种对温度变化非常敏感的半导体电阻，分为负温度系数和正温度系数两种。负温度系数的电阻率随温度升高急剧下降（通常为指数规律），而正温度系数的电阻率随温度升高急剧上升（也通常为指数规律）。相比之下，金属的电阻率随温度升高缓慢上升。热敏电阻对温度的反应更灵敏，体积也更小，热敏电阻制成的半导体温度计已广泛地使用在自动控制和科学仪器中，并在物理、化学和生物学研究等方面得到了广泛的应用。

（二）实验原理

1. 热敏电阻温度特性原理：

在一定的温度范围内，半导体的电阻率 ρ 和温度 T 之间有如下关系：

$$\rho = A_1 e^{B/T} \quad (1)$$

式中 A_1 和 B 是与材料物理性质有关的常数， T 为绝对温度。对于截面均匀的热敏电阻，其阻值 R_T 可用下式表示：

$$R_T = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

式中 R_T 的单位为 Ω ， ρ 的单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$ ， l 为两电极间的距离，单位为 cm ， S 为电阻的横截面积，单位为 cm^2 。将（1）式代入（2）式，令 $A = A_1 \frac{l}{S}$ ，于是可得：

$$R_T = A e^{B/T} \quad (3)$$

对一定的电阻而言， A 和 B 均为常数。对（3）式两边取对数，则有：

$$\ln R_T = B \frac{1}{T} + \ln A \quad (4)$$

$\ln R_T$ 与 $\frac{1}{T}$ 成线性关系，在实验中测得各个温度 T 的 R_T 值后，即可通过作图求出 B 和 A 值，代入（3）式，即可得到 R_T 的表达式。式中 R_T 为在温度 $T(\text{K})$ 时的电阻值 (Ω)， A 为在某温度时的电阻值 (Ω)， B 为常数 (K)，其值与半导体材料的成分和制造方法有关。

图 1 表示了热敏电阻与普通电阻的不同温度特性。

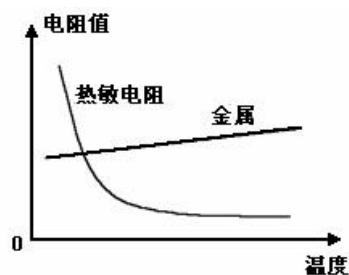


图1 热敏电阻和金属材料的温度特性

2. 热电偶测温原理：

热电偶亦称温差电偶，是由 A 、 B 两种不同材料的金属丝的端点彼此紧密接触而组成的。当两个接点处于不同温度时（如图 2），在回路中就有直流电动势产生，该电动势称温差电动势或热电动势。当组成热电偶的材料一定时，温差电动势 E_x 仅与两接点处的温度有关，并且两接点的温差在一定的温度范围内有如下近似关系式：

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

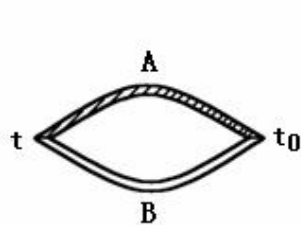


图 2

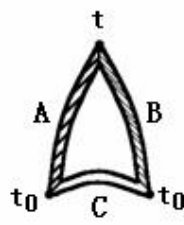


图 3

式中 α 称为温差电系数，对于不同金属组成的热电偶， α 是不同的，其数值上等于两接点温度差为 1°C 时所产生的电动势。

为了测量温差电动势，就需要在图 2 的回路中接入电位差计。根据伏打定律，即在 A、B 两种金属之间插入第三种金属 C 时，若它与 A、B 的两连接点处于同一温度 t_0 （图 3），则该闭合回路的温差电动势与上述只有 A、B 两种金属组成回路时的数值完全相同。所以，我们把 A、B 两根不同化学成份的金属丝的一端焊在一起，构成热电偶的热端（工作端）。将另两端各与铜引线（即第三种金属 C）焊接，构成两个同温度（ t_0 ）的冷端（自由端）。铜引线与电位差计相连，这样就组成一个热电偶温度计。如图 4 所示。将冷端置于保温杯内的冰水混合物中，保持 $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ，将热端置于待测温度处，即可测得相应的温差电动势，再根据事先校正好的曲线或数据来求出温度 t_0 。

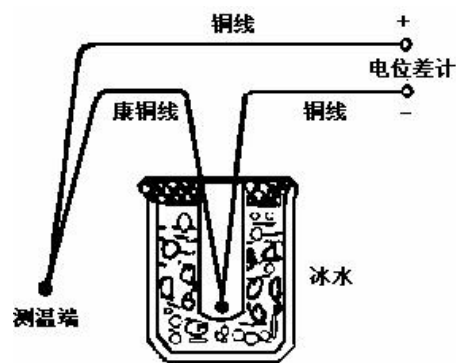


图 4

二、实验内容

（一）实验方案概述：

- 1、测量 MF53-1 热敏电阻（负温度系数）在不同温度下的电阻值变化，并将所测的对应数据作出 $R_T \sim t$ 曲线。指数拟合/取对数（转化为热力学温度），对比分析
- 2、测量 MZ11A 热敏电阻（正温度系数）在不同温度下的电阻值变化，并将所测的对应数据作出 $R_T \sim t$ 曲线。
- 3、测量 Cu50 铜电阻在不同温度下的电阻值变化，并将所测的对应数据作出 $R_T \sim t$ 曲线。直线
- 4、测量 Pt100 铂电阻在不同温度下的电阻值变化，并将所测的对应数据作出 $R_T \sim t$ 曲线。
- 5、热电偶温差电动势的测量。0.0428mV/摄氏度。

（二）数据处理与误差计算

1. 测量热敏电阻、铜电阻、铂电阻

记录表 1. MF53-1 负温度系数热敏电阻数据记录

室温 17.9 $^\circ\text{C}$

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
温度 ($^\circ\text{C}$)	23.0	28.0	33.0	38.0	43.0	48.0	53.0	58.0	63.0	68.0	73.0	78.0	83.0	88.0	93.0
电阻 ($\text{k}\Omega$)	3.125	2.607	2.170	1.822	1.529	1.296	1.099	0.934	0.795	0.681	0.587	0.507	0.440	0.3845	0.3350

序 号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
温度(°C)	93.0	88.0	83.0	78.0	73.0	68.0	63.0	58.0	53.0	48.0	43.0	38.0	33.0	28.0	23.0
电阻(kΩ)	0.3318	0.3775	0.4327	0.496	0.573	0.668	0.781	0.918	1.086	1.283	1.518	1.805	2.171	2.597	3.114

记录表 2. MZ11A 正温度系数热敏电阻数据记录 室温 17.9 °C

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
温度(°C)	22.0	27.0	32.0	37.0	42.0	47.0	52.0	57.0	62.0	67.0	72.0	77.0	82.0	87.0	92.0
电阻/(Ω)	308.5	349.8	397.4	451	517	587	672	768	876	995	1121	1263	1417	1588	1776
序 号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
温度(°C)	92.0	87.0	82.0	77.0	72.0	67.0	62.0	57.0	52.0	47.0	42.0	37.0	32.0	27.0	22.0
电阻/(Ω)	1788	1605	1435	1275	1126	991	868	756	658	574	503	441	385.6	340.3	302.8

记录表 3. 铜电阻 CU50 的电阻—温度特性数据记录 室温 17.9 °C

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
温度(°C)	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0
电阻/(Ω)	54.0	55.0	56.0	57.1	58.2	59.2	60.3	61.3	62.3	63.4	64.5	65.6	66.6	67.7	68.8
序 号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
温度(°C)	90.0	85.0	80.0	75.0	70.0	65.0	60.0	55.0	50.0	45.0	40.0	35.0	30.0	25.0	20.0
电阻/(Ω)	68.8	67.7	66.7	65.6	64.6	63.5	62.4	61.3	60.3	59.1	58.2	57.0	56.0	55.0	54.0

记录表 4. 铂电阻 PT100 电阻—温度特性数据记录 室温 17.9 °C

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
温度(°C)	21.0	26.0	31.0	36.0	41.0	46.0	51.0	56.0	61.0	66.0	71.0	76.0	81.0	86.0	91.0
电阻/(Ω)	108.5	110.4	112.4	114.3	116.3	118.2	120.1	122.1	124.0	126.0	127.9	129.8	131.8	133.7	135.6
序 号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
温度(°C)	91.0	86.0	81.0	76.0	71.0	66.0	61.0	56.0	51.0	46.0	41.0	36.0	31.0	26.0	21.0
电阻/(Ω)	135.7	133.7	131.8	129.8	127.9	126.1	124.1	122.1	120.2	118.2	116.3	114.3	112.4	110.4	108.5

2. 铜—康铜热电偶温差电动势测量

记录表 5. 热电偶测量数据记录

室温 17.9 °C , $t_0 = 0^\circ\text{C}$ (冰水混合物)

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
温度 t(°C)	24.0	29.0	34.0	39.0	44.0	49.0	54.0	59.0	64.0	69.0	74.0	79.0	84.0	89.0	94.0
电动势 (mV)	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.3	2.5	2.7	2.9	3.1	3.4	3.6	3.8
序 号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
温度 t(°C)	94.0	89.0	84.0	79.0	74.0	69.0	64.0	59.0	54.0	49.0	44.0	39.0	34.0	29.0	24.0
电动势 (mV)	3.8	3.5	3.3	3.1	2.9	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8

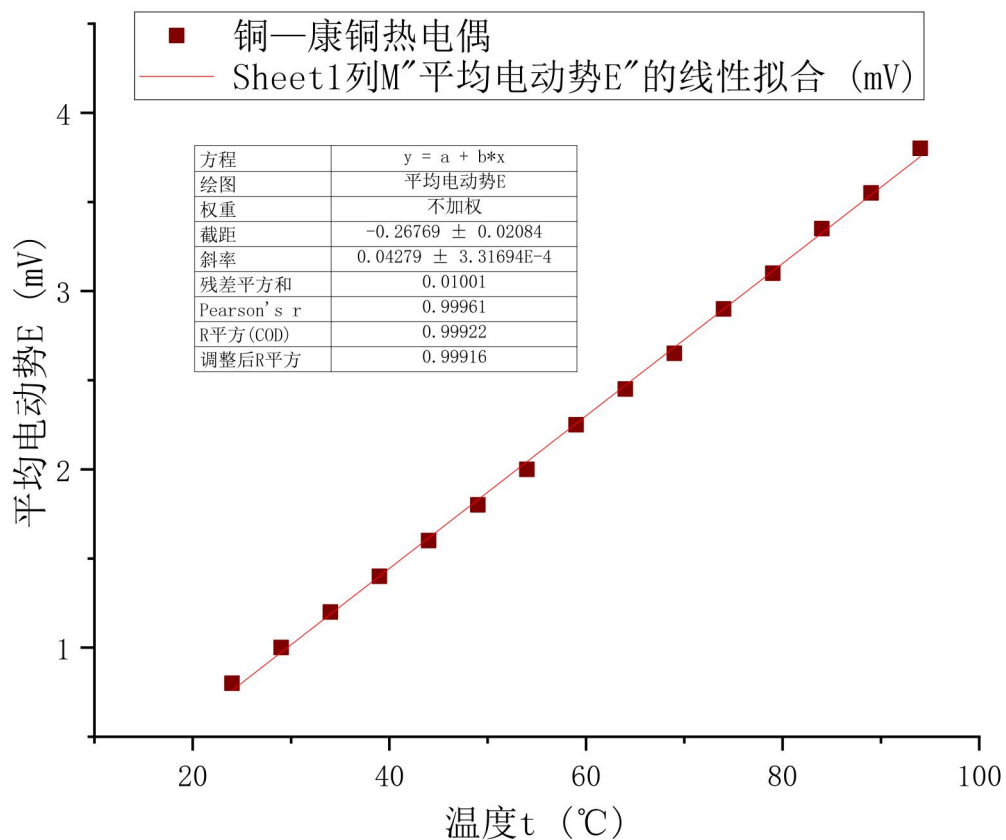


图 5

斜率为 $\alpha' = 0.04279 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, $R^2 = 0.99916$

理论斜率 $\alpha = 0.0428 \text{ mV}/^\circ\text{C}$

相对误差计算:

$$\delta = \frac{|0.0428 - 0.04279|}{0.0428} \times 100\% = 0.03\%$$

(三) 结果与误差原因分析

【实验结果】

1. 热敏电阻、铜电阻、铂电阻的平均电阻 R-温度 t 图像

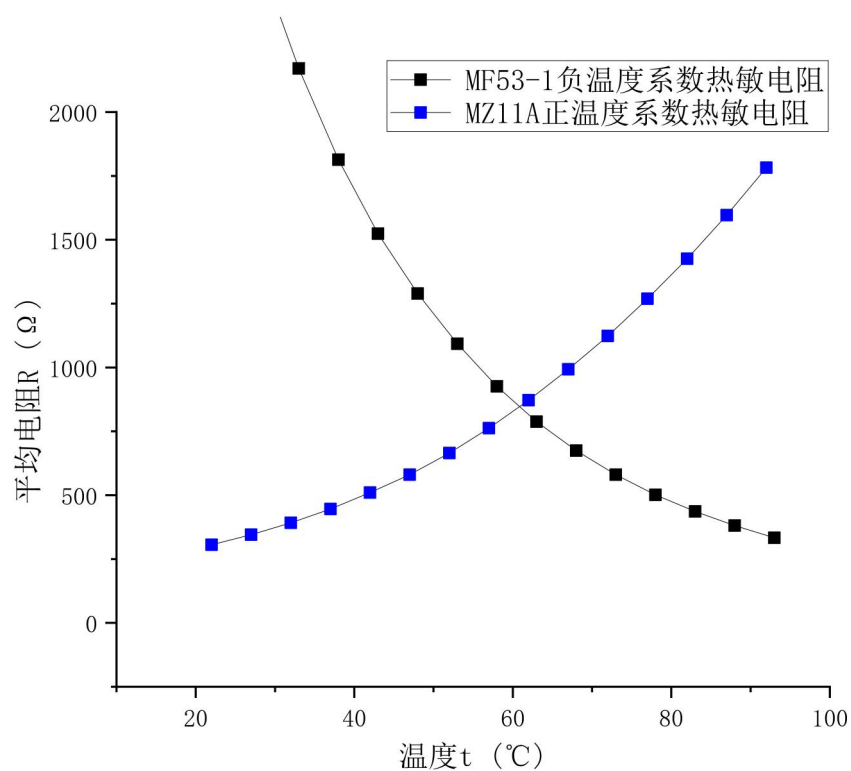


图 6 MF53-1 负温度系数热敏电阻 & MZ11A 正温度系数热敏电阻

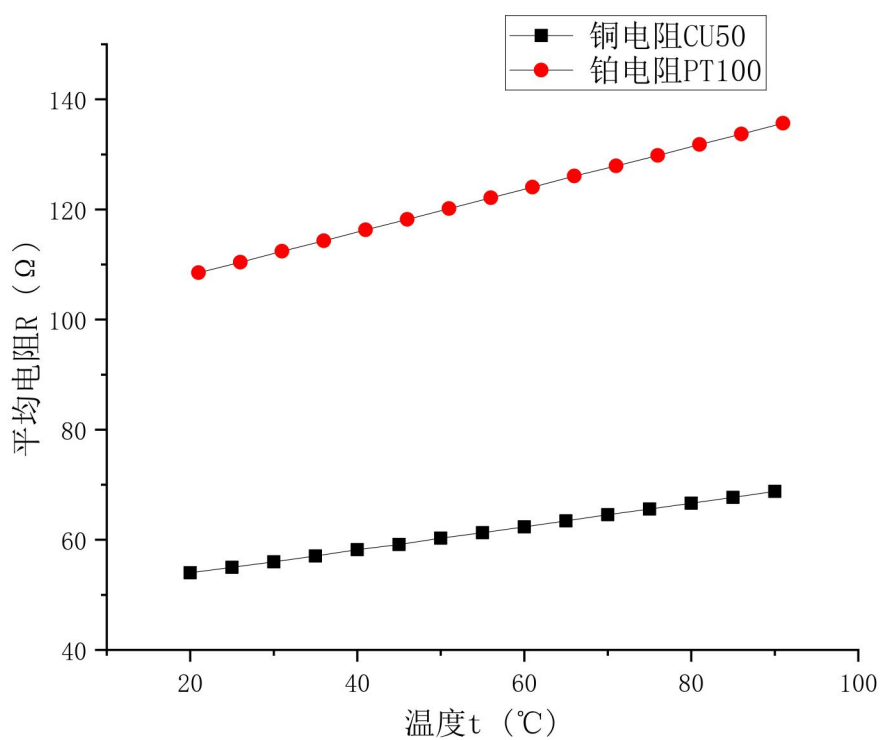


图 7 铜电阻 CU50 & 铂电阻 PT100

2. 热敏电阻 $R - \frac{1}{T}$ 图像曲线的指数拟合与 $\ln R - \frac{1}{T}$ 图像的线性拟合结果对比

MF53-1 负温度系数热敏电阻

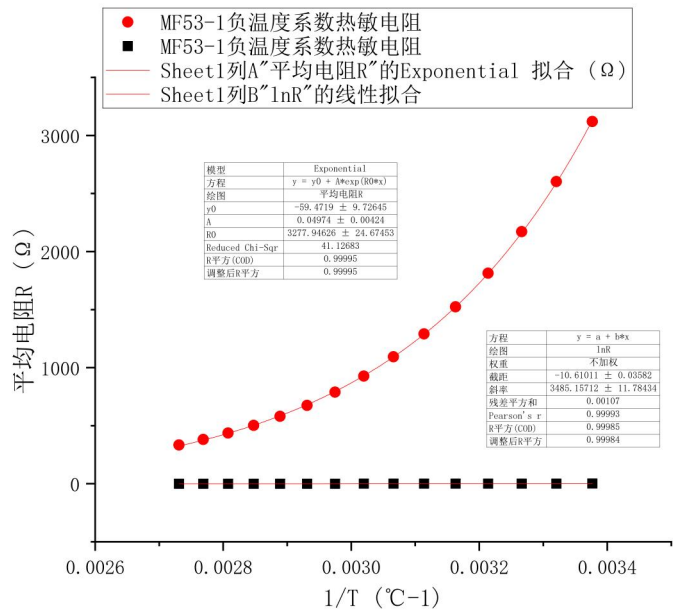


图 7

指数拟合: $R^2 = 0.99995$

线性拟合: $R^2 = 0.99984$

MZ11A 正温度系数热敏电阻

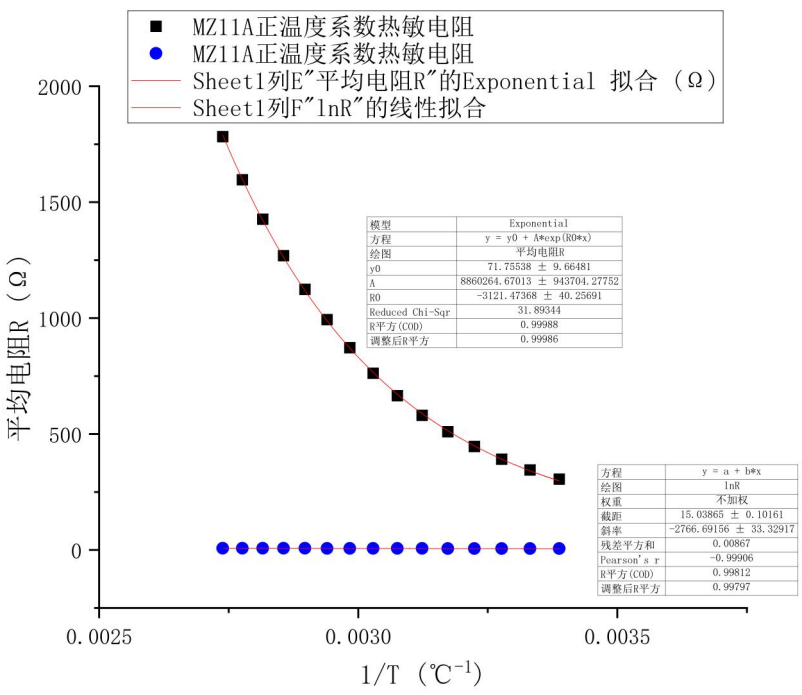


图 8

指数拟合: $R^2 = 0.99986$

线性拟合: $R^2 = 0.99797$

3. 铜—康铜热电偶温差电系数 α

测量结果 $\alpha' = 0.04279 \text{ mV/}^\circ\text{C}$

与理论值 $\alpha = 0.0428 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ 几乎一致，百分误差 $\delta = 0.03 \%$

【误差原因分析】

1. 温度响应时间引起的误差：屏幕显示的温度实际上是温度传感器的温度，温度传感器反映实际电阻的温度的过程理论上会存在一定的延迟，也就是说屏幕显示的温度与电阻实际温度之间存在一定的误差。当然，升温和降温各测一次能较好地减小这一误差。
2. 电势差读数的精度不高，只有两位有效数字，这会引起较大的相对不确定度。
3. 热电偶绝缘导致的误差：当保护管或配线柜中的污物或残留盐过多时，热电偶电极与保护管之间的绝缘不良会导致高温影响增大，从而可能导致热量损失和干扰，有时误差可能高达 100°C ，必须实际隔离或隔离热电偶和套管，以确保套管不会影响热电偶的热功率。清洁高温高压套管内壁，防止其他杂质和污物在热电偶和套管之间造成不良绝缘。为了减少外部环境造成的氧化物等因素对热电偶电势的影响，必须密封连接板或保持环境清洁。
4. 外部环境对测温元件的影响导致的误差：长期使用温度测量元件后，热电偶电极可能会腐蚀、氧化或不规则，从而导致热电偶的热电学性质发生变化。如果变化很大，其准确性将受到严重影响。解决这一问题的主要方法是保护热电偶连接盒，使连接盒的出口和盖板由橡胶连接密封，以避免丢失和损坏，从而有效减少腐蚀和氧化环境对温度测量元件的影响因为灰尘、粉煤灰等附着在绝缘线束的外部面上，温度测量元件的热阻会增加，从而防止导热并延

迟反应。此时，温度测量分量与测量温度的实际值不同。因此测温元件保护管外部必须清洁，以减少误差。高频磁场环境引起的错误。热电材料通常是具有一定电导率的合金材料。如果测温环境位于高频磁场中，一定的回旋电流发生在热电偶末端，一定的回旋电流损耗发生。尽管这些线圈的损耗很小，但由于热电偶末端尺寸较小，损耗密度可能很高，导致末端温度急剧上升。

（四）实验结论

1. 由热敏电阻、铜电阻、铂电阻的平均电阻 R -温度 t 图像可以得出，热敏电阻的阻值与温度大致呈指数关系，铜电阻、铂电阻的阻值与温度成线性关系。
2. 将热敏电阻 $R - \frac{1}{T}$ 图像曲线的指数拟合与 $\ln R - \frac{1}{T}$ 图像的线性拟合结果进行对比，发现指数拟合的 R^2 均大于线性拟合的 R^2 ，说明 $R - \frac{1}{T}$ 图像曲线的指数拟合比 $\ln R - \frac{1}{T}$ 图像的线性拟合的效果更好。同时验证了热敏电阻的阻值与热力学温度的倒数存在指数关系 $R_T = Ae^{B/T}$ 。
3. 通过测量铜—康铜热电偶温差电系数 α ，验证了当组成热电偶的材料一定时，温差电动势 E_x 与两接点处的温度在一定的温度范围内确实符合近似关系式 $E_x \approx \alpha(t - t_0)$ 。

三、实验拓展

1. 解释“热电效应”基本原理。

热电效应，即通过塞贝克效应和珀尔帖效应两种相关机制将热直接转化为电或电转化为热。当两种金属发生电接触时，电子从电子结合较少的金属流出，流入另一种金属。结合是通过金属中电子的所谓费米能级的位置来测

量的;级别越高, 绑定越低。费米能级表示金属导带内电子占据的能级和未被占据的能级之间的能量分界。费米能级电子的能量相对于金属外部的自由电子为 $-W$ 。电子在接触的两个导体之间继续流动, 直到静电势的变化使两种金属 (W_1 和 W_2) 的费米能级达到相同的值。这个静电势称为接触电位 ϕ_{12} , 由 $e\phi_{12} = W_1 - W_2$ 给出, 其中 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

如果闭合电路由两种不同的金属组成, 则电路中将没有净电动势, 因为两个接触电位彼此相反, 不会流过电流。如果其中一个结点的温度相对于第二个结点的温度升高, 就会有电流。电路中会产生净电动势, 因为这两种金属不太可能具有相同的温度依赖性费米能级。为了保持温差, 热量必须进入热端并离开冷端;这与电流可用于做机械功的事实是一致的。在结处产生的热电动势称为塞贝克效应(以爱沙尼亚出生的德国物理学家托马斯·约翰·塞贝克 (Thomas Johann Seebeck) 的名字命名)。电动势与不同金属的两个结点(称为热电偶)之间的温差近似线性。对于由铁和康铜(60% 的铜和 40% 镍的合金)制成的热电偶, 当冷端为 0°C 时, 热端为 100°C 时, 电动势约为 5 mV 。塞贝克效应的主要应用之一是温度的测量。介质的化学性质、测量的温度和所需的灵敏度决定了热电偶组件的选择。

2. 设计一个利用热敏电阻控制空调启停的系统, 要求: 简述测温基本原理; 设计系统框图; 解释系统工作过程。

(1) 测温基本原理

热敏电阻 (Thermistor) 是一种电阻随温度变化而变化的元件。它的基本工作原理是基于温度对电阻的影响。热敏电阻分为两类:

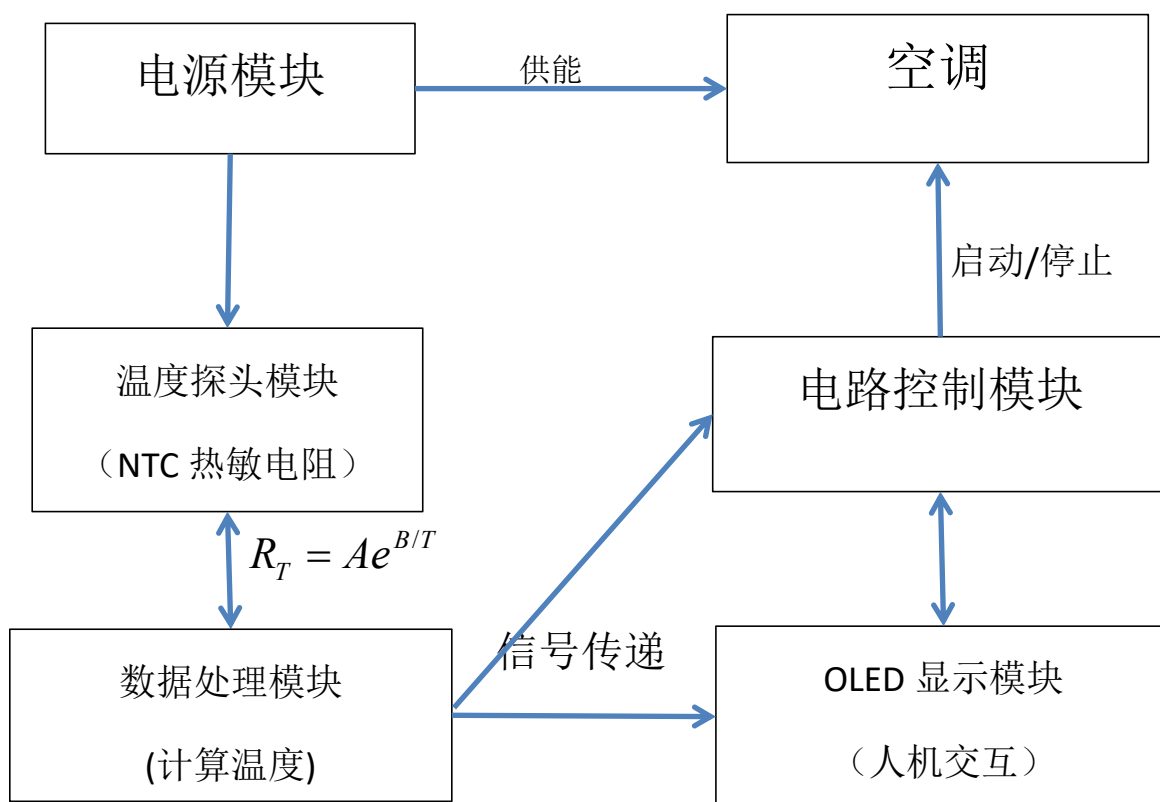
NTC 热敏电阻 (负温度系数): 温度升高时, 其电阻减小。

PTC 热敏电阻（正温度系数）：温度升高时，其电阻增大。

NTC 热敏电阻电阻值在常用的工作温度范围内变化平滑、适用的温度范围广泛、具有较好的温度传感性能、易于测量和控制的特性，在很多温度控制系统中得到了广泛的应用。例如，空调、冰箱、家电设备等常常使用 NTC 热敏电阻来精确地感应环境温度并进行控制。

数据处理：测量热敏电阻的电阻阻值可以测量温度。在一定的温度范围内，热敏电阻的电阻 R_T 和温度 T 之间有 $R_T = Ae^{B/T}$ ，式中 A 和 B 是与材料物理性质有关的常数， T 为绝对温度。式中 R_T 的单位为 Ω 。

(2) 系统框图设计



系统工作过程解释

a. 温度探头模块

- 热敏电阻作为温度传感器，与一个限流电阻串联，组成一个电桥电路或者分

压电路。

- 当环境温度变化时，热敏电阻的电阻值也发生变化，导致电压输出发生变化。
- 该电压变化被转换成数字信号，送入数据处理模块。

b. 数据处理模块

- 该模块接收到从温度测量模块传来的温度信号，经过处理后与预设的温度阈值进行比较。将计算结果传输给电路控制模块。
- 例如，当室内温度高于设定的上限（比如 28°C ）时，系统认为空调应开启；当室内温度低于设定的下限（比如 24°C ）时，空调应关闭。
- 模块通过逻辑判断（例如：如果温度 $> 28^{\circ}\text{C}$ ，则输出空调开启信号；如果温度 $< 24^{\circ}\text{C}$ ，则输出空调关闭信号）。

c. 电路控制模块

- 电路控制模块输出一个控制信号（如高电平或低电平），该信号用于控制空调的启停。**同时承担 OLED 显示模块的输入与输出。**

- 控制信号可以通过继电器、固态开关等方式输出，具体取决于空调控制接口。

d. OLED 显示模块

- 将温度信息，空调启停状态进行显示。并可由外部输入预设温度信息，实现良好的人机交互。

（3）工作流程举例

假设系统的设定温度为：

- 空调开启温度： 28°C
- 空调关闭温度： 24°C

a. 环境温度升高：

- 环境温度逐渐升高，热敏电阻的电阻减小，输出电压上升。
 - 温度探头模块与数据处理模块检测到温度超过 28°C ，输出“开启空调”信号
 - 电路控制模块接收到该信号后，开启空调。
 - OLED 显示模块收到该信号后，显示实时温度和显示开启空调。
- b. 环境温度降低：
- 空调开始降温，环境温度逐渐下降，热敏电阻的电阻增大，输出电压下降。
 - 温度探头模块与数据处理模块检测温度降至 24°C 以下，输出“关闭空调”信号。
 - 电路控制模块接收到该信号后，关闭空调。
 - OLED 显示模块收到该信号后，显示实时温度和显示关闭空调。
- c. 温度维持稳定：
- 当室内温度保持在设定范围内，空调保持关闭或开启状态，直到温度再次发生变化。

（4）总结

通过 NTC 热敏电阻的温度感应功能和温度处理模块的智能判断，我们可以实现一个简单且高效的空调自动启停控制系统。该系统能够在不同的温度条件下自动调节空调的开关，提供舒适的室内环境并节约能源。

四、参考文献

- [1] 张蔡婕, 张贤高, 陈信. 热敏电阻温度特性实验的滞后性误差探讨[J]. 探索与观察, 2019.
- [2] 杨智显, 胡安杰, 刘东. 基于 STM32 的冷暖两联供控制系统设计[J]. 电子设计工程, 2023, 21(21): 1-6.