

## 实验三 温度传感器特性的研究

温度传感器是检测温度的器件，被广泛用于工农业生产、科学研究和生活等领域，其种类多，发展快。温度传感器一般分为接触式和非接触式两大类。所谓接触式就是传感器直接与被测物体接触进行温度测量，这是温度测量的基本形式。而非接触式是测量物体热辐射而发出的红外线从而测量物体的温度，可进行遥测，这是接触方式所做不到的。

接触式温度传感器有热电偶、热敏电阻以及铂电阻等，利用其产生的热电动势或电阻随温度变化的特性来测量物体的温度，被广泛用于家用电器、汽车、船舶、控制设备、工业测量、通信设备等。另外，还有一些新开发研制的传感器，例如，有利用半导体 PN 结电流/电压特性随温度变化的半导体集成传感器；有利用光纤传播特性随温度变化或半导体透光随温度变化的光纤传感器；有利用弹性表面波及振子的振荡频率随温度变化的传感器；有利用核四重共振的振荡频率随温度变化的 NQR 传感器；有利用在居里温度附近磁性急剧变化的磁性温度传感器以及利用液晶或涂料颜色随温度变化的传感器等。

非接触方式是通过检测光传感器中红外线来测量物体的温度，有利用半导体吸收光而使电子迁移的量子型与吸收光而引起温度变化的热型传感器。非接触传感器广泛用于接触温度传感器、辐射温度计、报警装置、来客告知器、火灾报警器、自动门、气体分析仪、分光光度计、资源探测等。

本实验将通过测量几种常用的接触式温度传感器的特征物理量随温度的变化，来了解这些温度传感器的工作原理。

### 【实验目的】

1. 了解几种常用的接触式温度传感器的原理及其应用范围；
2. 测量这些温度传感器的特征物理量随温度的变化曲线。

### 【实验原理】

#### 1. 铂电阻

导体的电阻值随温度变化而改变，通过测量其电阻值推算出被测环境的温度，利用此原理构成的传感器就是热电阻温度传感器。能够用于制作热电阻的金属材料必须具备以下特性：（1）电阻温度系数要尽可能大和稳定，电阻值与温度之间应具有良好的线性关系；（2）电阻率高，热容量小，反应速度快；（3）材料的复现性和工艺性好，价格低；（4）在测量范围内物理和化学性质稳定。目前，在工业中应用最广的材料是铂和铜。

铂电阻与温度之间的关系，在  $0\sim 630.74\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内可用下式表示

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2) \quad (1)$$

在  $-200\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度范围内为

$$R_T = R_0[1 + AT + BT^2 + C(T - 100^{\circ}\text{C})T^3] \quad (2)$$

式中,  $R_0$ 和 $R_T$ 分别为在  $0^\circ\text{C}$ 和温度 $T$ 时铂电阻的电阻值,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 为温度系数, 由实验确定,  $A = 3.90802 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $B = -5.80195 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$ ,  $C = -4.27350 \times 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$ . 由式 (1) 和式 (2) 可见, 要确定电阻 $R_T$ 与温度 $T$ 的关系, 首先要确定 $R_0$ 的数值,  $R_0$ 值不同时,  $R_T$ 与 $T$ 的关系不同. 目前国内统一设计的一般工业用标准铂电阻 $R_0$ 值有  $100 \Omega$  和  $500 \Omega$  两种, 并将电阻值 $R_T$ 与温度 $T$ 的相应关系统一列成表格, 称其为铂电阻的分度表, 分度号分别用 Pt100 和 Pt500 表示.

铂电阻在常用的热电阻中准确度最高, 国际温标 ITS-90 中还规定, 将具有特殊构造的铂电阻作为  $13.5033 \text{ K} \sim 961.78^\circ\text{C}$  标准温度计来使用. 铂电阻广泛用于  $-200 \sim 850^\circ\text{C}$  范围内的温度测量, 工业中通常在  $600^\circ\text{C}$  以下.

## 2. 半导体热敏电阻

热敏电阻是其电阻值随温度显著变化的一种热敏元件. 热敏电阻按其电阻随温度变化的典型特性可分为三类, 即负温度系数 (NTC) 热敏电阻, 正温度系数 (PTC) 热敏电阻和临界温度电阻器 (CTR). PTC 和 CTR 型热敏电阻在某些温度范围内, 其电阻值会产生急剧变化, 适用于某些狭窄温度范围内一些特殊应用, 而 NTC 热敏电阻可用于较宽温度范围的测量. 热敏电阻的电阻 - 温度特性曲线如图 1 所示.

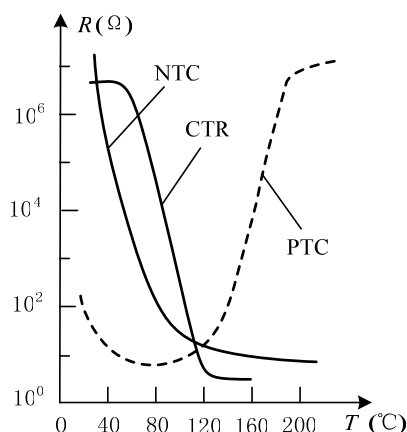


图 1 热敏电阻的电阻 - 温度特性曲线

NTC 半导体热敏电阻是由一些金属氧化物, 如钴、锰、镍、铜等过渡金属的氧化物, 采用不同比例的配方, 经高温烧结而成, 然后采用不同的封装形式制成珠状、片状、杆状、垫圈状等各种形状. 与金属导体热电阻比较, 半导体热敏电阻具有以下特点: (1) 有很大的负电阻温度系数, 因此其温度测量的灵敏度也比较高; (2) 体积小, 目前最小的珠状热敏电阻的尺寸可达  $\phi 0.2 \text{ mm}$ , 故热容量很小, 可作为点温或表面温度以及快速变化温度的测量; (3) 具有很大的电阻值 ( $10^2 \sim 10^5 \Omega$ ), 因此可以忽略线路导线电阻和接触电阻等的影响, 特别适用于远距离的温度测量和控制; (4) 制造工艺比较简单, 价格便宜. 半导体热敏电阻的缺点是温度测量范围较窄.

半导体热敏电阻具有负电阻温度系数, 其电阻值随温度升高而减小, 电阻与温度的关系可以用下面的经验公式表示

$$R_T = A \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (3)$$

式中,  $R_T$ 为在温度为 $T$ 时的电阻值,  $T$ 为绝对温度 (以 $\text{K}$ 为单位),  $A$ 和 $B$ 分别为具有电阻量纲和温度量纲, 并且与热敏电阻的材料和结构有关的常数. 由式 (3) 可得到当温度为 $T_0$ 时的电阻值 $R_0$ , 即

$$R_0 = A \exp\left(\frac{B}{T_0}\right) \quad (4)$$

比较式 (3) 和式 (4), 可得

$$R_T = R_0 \exp\left[B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (5)$$

从式 (5) 可以看出, 只要知道常数  $B$  和在温度为  $T_0$  时的电阻值  $R_0$ , 就可以利用式 (5) 计算在任意温度  $T$  时的  $R_T$  值. 常数  $B$  可以通过实验来确定. 将式 (5) 两边取对数, 则有

$$\ln R_T = \ln R_0 + B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) \quad (6)$$

从式 (6) 可以看出,  $\ln R_T$  与  $1/T$  成线性关系, 直线的斜率就是常数  $B$ . 热敏电阻的材料常数  $B$  一般在 2000~6000 K 范围内.

热敏电阻的温度系数  $\alpha_T$  定义如下

$$\alpha_T = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{dR_T}{dT} = -\frac{B}{T^2} \quad (7)$$

由式 (7) 可以看出,  $\alpha_T$  是随温度降低而迅速增大.  $\alpha_T$  决定热敏电阻在全部工作范围内的温度灵敏度. 热敏电阻的测温灵敏度比金属热电阻的高很多. 例如,  $B$  值为 4000 K, 当  $T = 293.15$  K (20 °C) 时, 热敏电阻的  $\alpha_T = 4.7\%/^{\circ}\text{C}$ , 约为铂电阻的 12 倍.

### 3. PN 结温度传感器

PN 结温度传感器是利用半导体材料和器件的某些性能参数的温度依赖性, 实现对温度的检测、控制和补偿等功能. 实验表明, 在一定的电流模式下, PN 结的正向电压与温度之间具有很好的线性关系.

根据 PN 结理论, 对于理想二极管, 只要正向电压  $U_F$  大于几个  $k_B T/e$  ( $k_B$  为波尔兹曼常数,  $e$  为电子电荷). 其正向电流  $I_F$  与正向电压  $U_F$  和温度  $T$  之间的关系可表示为

$$U_F = U_g + \frac{k_B}{q} \left\{ \ln \frac{I_F}{B} - \left(3 + \frac{r}{2}\right) \ln T \right\} T \quad (8)$$

式中,  $U_g = E_g/e$ ,  $E_g$  为材料在  $T = 0$  K 时的禁带宽度 (以 eV 为单位),  $B$  和  $r$  为常数.

由半导体理论可知, 对于实际二极管, 只要

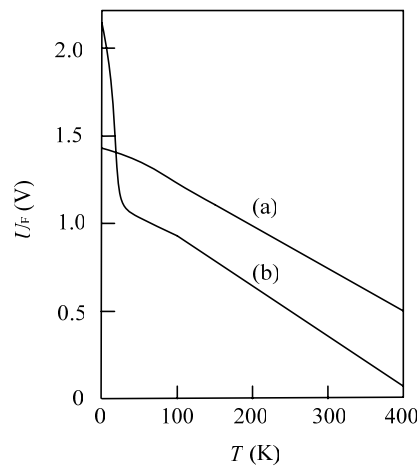


图2 砷化镓 (a) 和硅 (b) 二极管正向电压随温度的变化

它们工作的 PN 结空间电荷区中的复合电流和表面漏电流可以忽略,而又未发生大注入效应的电压和温度范围内,其特性与上述理想二极管是相符合的.实验表明,对于砷化镓、锗和硅二极管,在一个相当宽的温度范围内,其正向电压与温度之间的关系与式(8)是一致的,如图2所示.

实验发现晶体管发射结上的正向电压随温度的上升而近似线性下降,这种特性与二极管十分相似,但晶体管表现出比二极管更好的线性和互换性.二极管的温度特性只对扩散电流成立,但实际二极管的正向电流除扩散电流成分外,还包括空间电荷区中的复合电流和表面漏电流成分.这两种电流与温度的关系不同于扩散电流与温度的关系,因此,实际二极管的电压-温度特性是偏离理想情况的.由于三极管在发射结正向偏置条件下,虽然发射结也包括上述三种电流成分,但是只有其中的扩散电流成分能够到达集电极形成集电极电流,而另外两种电流成分则作为基极电流漏掉,并不到达集电极.因此,晶体管的 $I_C - U_{BE}$ 关系比二极管的 $I_F - U_F$ 关系更符合理想情况,所以表现出更好的电压-温度线性关系.根据晶体的有关理论可以证明,NPN晶体管的基极-发射极电压 $U_{BE}$ 与温度 $T$ 和集电极电流 $I_C$ 的函数关系与二极管的 $U_F$ 与 $T$ 和 $I_F$ 函数关系式(8)相同.因此,在集电极电流 $I_C$ 恒定条件下,晶体管的基极-发射极电压 $U_{BE}$ 与温度 $T$ 呈线性关系.但严格地说,这种线性关系是不完全的,因为关系式中存在非线性项.

#### 4. 集成温度传感器

集成温度传感器是将温敏晶体管及其辅助电路集成在同一芯片的集成化温度传感器.这种传感器最大的优点是直接给出正比于绝对温度的理想的线性输出.目前,集成温度传感器已广泛用于 $-50 \sim +150^\circ\text{C}$ 温度范围内的温度检测、控制和补偿等.集成温度传感器按输出形式可分为电压型和电流型两种.三端电压输出型集成温度传感器是一种精密的、易于定标的温度传感器,如LM135, LM235, LM335系列等.其主要性能指标如下:(1)工作温度范围: $-50 \sim +150^\circ\text{C}$ ,  $-40 \sim +125^\circ\text{C}$ ,  $-10 \sim +100^\circ\text{C}$ ;(2)灵敏度:10 mV/K;(3)测量误差:工作电流在0.4~5 mA范围内变化时,如果在 $25^\circ\text{C}$ 下定标,在 $100^\circ\text{C}$ 的温度范围内误差小于 $1^\circ\text{C}$ .图3(a)示出这类温度传感器的基本测温电路.把传感器作为一个两端器件与一个电阻串联,加上适当电压就可以得到灵敏度为10 mV/K,直接正比于

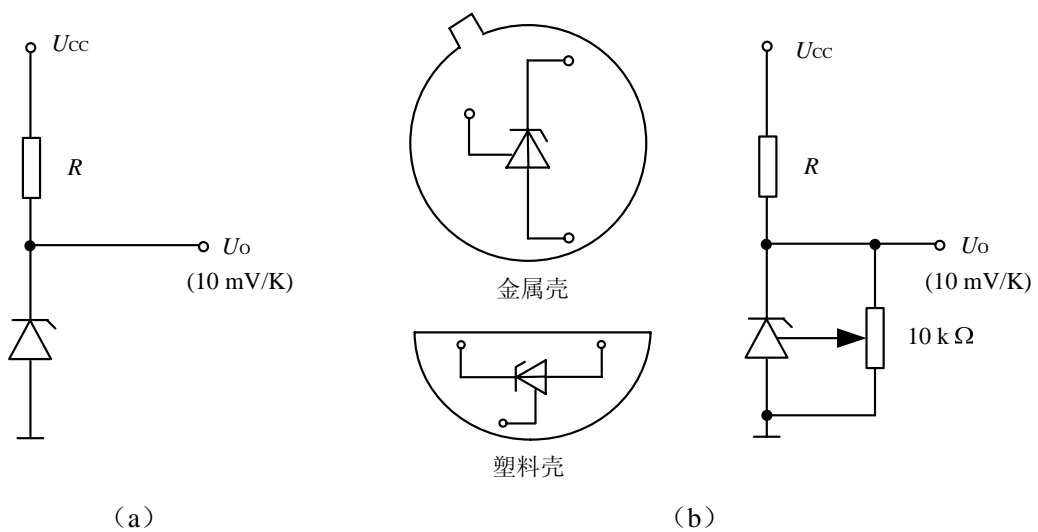


图3 测温电路 (a) 基本测温电路 (b) 可定标的测温电路

绝对温度的输出电压 $U_o$ 。实际上，这时可以看成是温度为 10 mV/K 的电压源。传感器的工作电流由电阻 $R$ 和电源电压 $U_{CC}$ 决定：

$$I = (U_{CC} - U_o) / R \quad (9)$$

由此可见，工作电流随温度变化，但是对于 LM135 等系列传感器作为电压源时，其内阻极小，故电流变化并不影响输出电压。如果这些系列的传感器作为三端器件使用时，可通过外接电位器的调节完成温度定标，以减小工艺偏差而产生的误差，其连接如图 3 (b) 所示。例如，在 25°C (298.15 K) 下，调节电位器使输出电压为 2.982 V，经如此定标后，传感器的灵敏度达到设计值 10 mV/K 的要求，从而提高了测温精度。

电流型集成温度传感器，在一定温度下，它相当于一个恒流源，输出电流与绝对温度成正比。因此，它具有不易受接触电阻和引线电阻的影响以及电压噪声的干扰。例如，美国 AD 公司的产品 AD590 电流型集成温度传感器，只需要单电源 (+4~+30 V)，即可实现温度到电流的线性变换，然后在终端使用一只取样电阻即可实现电流到电压的转换，使用十分方便。而且，电流型比电压型的测量精度更高。AD590 的主要性能指标如下：(1) 电源电压：+4~+30 V；(2) 工作温度范围：-50~+150°C；(3) 标称输出电流（在 25°C）：298.2  $\mu$ A；(4) 标称温度系数：1  $\mu$ A/K；(5) 测量误差：校准时为  $\pm 1.0$  °C，不校准时为  $\pm 1.7$  °C。图 4 是 AD590 构成的简单温度测量电路。每 1 K 温度时，输出电流为 1  $\mu$ A，因此，每 1 K 温度时负载 $R$ 两端电压为 1 mV。

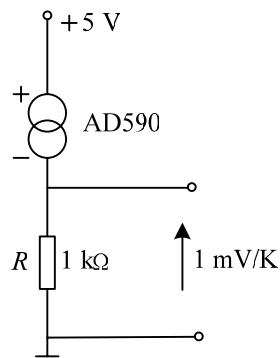


图 4 AD590 的简单温度测量电路

### 【实验仪器】

1. 温度传感器：铂电阻(薄膜型 Pt100)，AD590 集成温度传感器，半导体热敏电阻，晶体管 PN 结温度传感器。
2. 温度控制系统：不锈钢保温杯、加热电阻和硅油，交流低压加热电源，数字铂电阻温度计。
3. 测量仪表及电源：数字万用表，直流稳压电源(5 V)，直流恒流电源(1 mA, 100  $\mu$ A)。

### 【实验内容】

1. 铂电阻  
测量室温~150°C 温度范围内薄膜型铂电阻温度传感器的电阻随温度的变化曲线，并确定其温度系数。
2. AD590 集成温度传感器  
测量室温~150°C 温度范围内 AD590 集成温度传感器的输出电流随温度的变化曲线，并确定其温度系数。
3. 半导体热敏电阻

测量室温~120℃温度范围内半导体热敏电阻随温度的变化曲线，并确定热敏电阻的  $B$  值。

#### 4. 晶体管 PN 结温度传感器

测量室温~150℃温度范围内晶体管基极—发射极电压  $U_{BE}$  随温度的变化曲线，集电极电流  $I_C$  取 100  $\mu\text{A}$ ，并确定其温度系数。

### 【注意事项】

1. 待测温度传感器与温度测量用铂电阻要紧贴放在加热油浴内。
2. 升温测量过程中，温度传感器在加热油浴内的位置不要移动。
3. 晶体管 PN 结和 AD590 集成温度传感器与电源连接时，正负极不可接错。
4. 实验过程中，要避免将油滴到桌面和地面上，并且要小心热油烫伤。

### 【参考资料】

- [1] 黄贤武，郑筱霞编著. 传感器原理与应用. 成都：电子科技大学出版社，1999
- [2] 何希才编著. 传感器及其应用. 北京：国防工业出版社，2001
- [3] 游伯坤，阚家钜，江兆章编著. 温度测量与仪表—热电偶和热电阻. 北京：科学技术文献出版社，1990
- [4] 阎守胜，陆果编著. 低温物理实验的原理与方法. 北京：科学出版社，1985

### 【附录】

铂电阻Pt100 分度表， $R(0^\circ\text{C}) = 100.00\ \Omega$ ， $T = T_1 + T_2\ (^{\circ}\text{C})$

$T_1 \backslash T_2$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-200	18.49	22.80	27.08	31.32	35.53	39.71	43.87	48.00	52.11	56.19
-100	60.25	64.30	68.33	72.33	76.33	80.31	84.27	88.22	92.19	96.09
0	100.00	103.90	107.79	111.67	115.54	119.40	123.24	127.07	130.89	134.70
100	138.50	142.29	146.06	149.82	153.58	157.31	161.04	164.76	168.46	172.16
200	175.84	179.51	183.17	186.82	190.45	194.07	197.69	201.29	204.88	208.45
300	212.02	215.57	219.12	222.65	226.17	229.67	233.17	236.65	240.13	243.59
400	247.04	250.48	253.90	257.32	260.72	264.11	267.49	270.86	274.22	277.56
500	280.90	284.22	287.53	290.83	294.11	297.39	300.56	303.91	307.15	310.38
600	313.59	316.80	319.99	323.18	326.35	329.51	332.66	335.79	338.92	342.03