

非平衡电桥的原理和设计应用

电桥可分为平衡电桥和非平衡电桥，非平衡电桥也称不平衡电桥或微差电桥。以往在教学中往往只做平衡电桥实验。近年来，非平衡电桥在教学中受到了较多的重视，因为通过它可以测量一些变化的非电量，这就把电桥的应用范围扩展到很多领域，所以在工程测量中非平衡电桥也得到了广泛的应用。

一、实验目的

- 1、掌握非平衡电桥的工作原理以及与平衡电桥的异同
- 2、掌握利用非平衡电桥的输出电压来测量变化电阻的原理和方法
- 3、设计一个数显温度计，掌握非平衡电桥测量温度的方法，并类推至测其它非电量。

二、实验内容

- 1、用非平衡电桥测量热敏电阻的温度特性
- 2、用热敏电阻为传感器结合非平衡电桥设计测量范围为 30.0~50.0℃ 的数显温度计

三、实验仪器及配件

- 1、DHQJ-1 型非平衡电桥
- 2、DHW-1/ DHW-2 型温度传感实验装置或 DHT-2 型热学实验仪(含 2.7K Ω 热敏电阻)

四、实验原理

非平衡电桥的原理图见图 1。

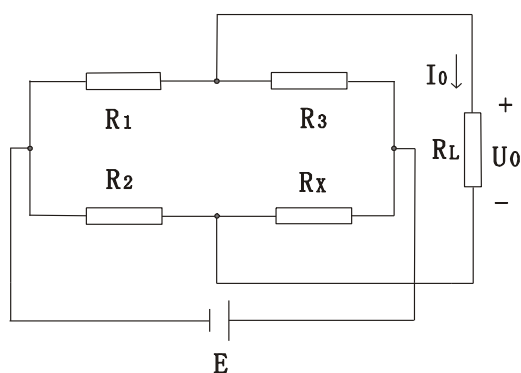


图 1

非平衡电桥在构成形式上与平衡电桥相似，但测量方法上有很大差别。平衡电桥是调节 R_3 使 $I_0=0$ ，从而得到 $R_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_3$ ，非平衡电桥则是使 R_1 、 R_2 、 R_3 保持不变， R_x 变化时则 U_0 变化。再根据 U_0 与 R_x 的函数关系，通过检测 U_0 的变化从而测得 R_x 。由于可以检测连续变化的 U_0 ，所以可以检测连续变化的 R_x ，

进而检测连续变化的非电量。

（一）非平衡电桥的桥路形式

1、等臂电桥

电桥的四个桥臂阻值相等，即 $R_1=R_2=R_3=R_{X0}$ ；其中 R_{X0} 是 R_X 的初始值，这时电桥处于平衡状态， $U_0=0$ 。

2、卧式电桥也称输出对称电桥

这时电桥的桥臂电阻对称于输出端，即 $R_1=R_3$ ， $R_2=R_{X0}$ ，但 $R_1 \neq R_2$

3、立式电桥也称电源对称电桥

这时从电桥的电源端看桥臂电阻对称相等即

$$R_1=R_2 \quad R_{X0}=R_3 \quad \text{但 } R_1 \neq R_3$$

4、比例电桥

这时桥臂电阻成一定的比例关系，即 $R_1=KR_2$ ， $R_3=KR_{X0}$ 或 $R_1=K R_3$ ， $R_2=K R_{X0}$ ， K 为比例系数。实际上这是一般形式的非平衡电桥。

（二）非平衡电桥的输出

非平衡电桥的输出接负载大小分类又可分为两种。一种是负载阻抗相对于桥臂电阻很大，如输入阻抗很高的数字电压表或输入阻抗很大的运算放大电路；另一种是负载阻抗较小，和桥臂电阻相比拟。后一种由于非平衡电桥需输出一定的功率，故又称为功率电桥。

根据戴维南定理，图 1 所示的桥路可等效为图 2（a）所示的二端口网络。

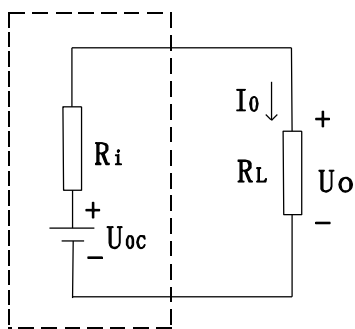


图 2（a）

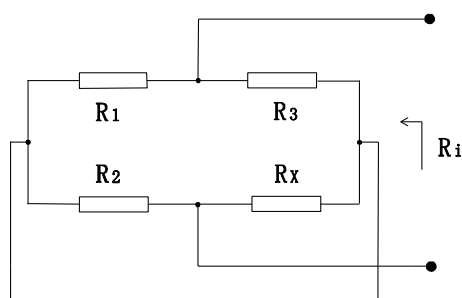


图 2（b）

其中 U_{oc} 为等效电源， R_i 为等效内阻。

由图 1 可知，在 $R_L=\infty$ 时，等效电源电压值为：

$$U_{oc} = E \left(\frac{R_X}{R_2 + R_X} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right)$$

根据戴维南定理，将 E 电源短路，得到图 2（b）电路，据此可求出电桥等效内阻：

$$R_i = \frac{R_2 R_X}{R_2 + R_X} + \frac{R_3 R_1}{R_1 + R_3}$$

根据图 2 (a) 电路, 得到电桥接有负载 R_L 时输出电压:

$$U_0 = \frac{R_L}{R_i + R_L} \left(\frac{R_x}{R_2 + R_x} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) \cdot E \quad (1)$$

电压输出的情况下 $R_L \rightarrow \infty$, 所以有

$$U_0 = \left(\frac{R_x}{R_2 + R_x} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) \cdot E \quad (2)$$

根据 (1) 式, 可进一步分析电桥输出电压和被测电阻值关系。

令 $R_x = R_{x0} + \Delta R$, R_x 为被测电阻, ΔR 为电阻变化量。

根据 (1) 式,

$$\begin{aligned} U_0 &= \frac{R_L}{R_i + R_L} \left(\frac{R_x}{R_2 + R_x} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) \cdot E \\ &= \frac{R_L}{R_i + R_L} \left(\frac{R_{x0} + \Delta R}{R_2 + R_{x0} + \Delta R} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) \cdot E \\ &= \frac{R_L}{R_i + R_L} \frac{(R_{x0} + \Delta R)(R_1 + R_3) - R_3(R_2 + R_{x0} + \Delta R)}{(R_2 + R_{x0} + \Delta R)(R_1 + R_3)} E \\ &= \frac{R_L}{R_i + R_L} \frac{R_3 R_2 - R_1 R_{x0} + R_1 \Delta R}{(R_2 + R_{x0} + \Delta R)(R_1 + R_3)} E \end{aligned}$$

因为 R_{x0} 为其初始值, 此时电桥平衡, 有 $R_1 R_{x0} = R_3 R_2$, 所以

$$U_0 = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot \frac{\Delta R \cdot R_1}{(R_2 + R_{x0} + \Delta R)(R_1 + R_3)} \cdot E \quad (3)$$

当 $R_L = \infty$ 时,

$$U_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_3} \cdot \frac{\Delta R \cdot E}{R_2 + R_{x0} + \Delta R}$$

因为 $R_1 R_{x0} = R_3 R_2$, 所以 $R_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_{x0}}$, 代入上式有

$$\begin{aligned} U_0 &= \frac{R_2}{R_2 + R_{x0}} \cdot \frac{E}{\frac{R_2 + R_{x0} + \Delta R}{R_2 + R_{x0}} (R_2 + R_{x0})} \Delta R \\ &= \frac{R_2}{(R_2 + R_{x0})^2} \cdot \frac{E}{1 + \frac{\Delta R}{R_2 + R_{x0}}} \Delta R \end{aligned} \quad (4)$$

(3)、(4) 式就是作为一般形式非平衡电桥的输出与被测电阻的函数关系。

特殊地, 对于等臂电桥和卧式电桥, (4) 式简化为

$$U_0 = \frac{1}{4} \frac{E}{R_{x0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{2R_{x0}}} \cdot \Delta R \quad (5)$$

立式电桥和比例电桥的输出与 (4) 式相同。

被测电阻的 $\Delta R \ll R_{X0}$ 时, (4) 式可简化为

$$U_0 = \frac{R_2}{(R_2 + R_{X0})^2} \cdot E \cdot \Delta R \quad (6)$$

(5) 式可进一步简化为

$$U_0 = -\frac{1}{4} \frac{E}{R_{X0}} \cdot \Delta R \quad (7)$$

这时 U_0 与 ΔR 成线性关系

(三) 用非平衡电桥测量电阻的方法

习惯上, 人们称 $R_L = \infty$ 的非平衡应用的电桥叫非平衡电桥; 称具有负载 R_L 的非平衡应用的电桥叫功率电桥。下述的“非平衡电桥”都是指 $R_L = \infty$ 的非平衡应用的电桥。

1、将被测电阻 (传感器) 接入非平衡电桥, 并进行初始平衡, 这时电桥输出为 0。改变被测的非电量, 则被测电阻发生变化, 这时电桥输出电压 $u_0 \neq 0$, 开始作相应变化。测出这个电压后, 可根据 (4) 式或 (5) 式计算得到 ΔR 。对于 $\Delta R \ll R_{X0}$ 的情况下可按 (6) 式或 (7) 式计算得到 ΔR 值。

2、根据测量结果求得 $R_x = R_{X0} + \Delta R$, 并可作 $U_0 - \Delta R$ 曲线, 曲线的斜率就是电桥的测量灵敏度。根据所得曲线, 可由 U_0 的值得到 ΔR 的值, 也就是可根据电桥的输出 U_0 来测得被测电阻 R_x 值。

(四) 用非平衡电桥测温度方法

1、用线性电阻测温度

一般来说, 金属的电阻随温度的变化, 可用下式描述:

$$R_x = R_{X0} (1 + \alpha t + \beta t^2) \quad (8)$$

如铜电阻传感器 $R_{X0} = 50 \Omega$ ($t = 0^\circ\text{C}$ 时的电阻值)

$$\alpha = 4.289 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$$

$$\beta = -2.133 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$$

一般分析时, 在温度不是很高的情况下, 忽略温度二次项 βt^2 , 可将金属的电阻值随温度变化视为线性变化即

$$R_x = R_{X0} (1 + \alpha t) = R_{X0} + \alpha t R_{X0}$$

所以 $\Delta R = \alpha R_{X0} \Delta t$, 代入 (4) 式有

$$U_0 = \frac{R_2}{(R_2 + R_{X0})^2} \cdot \frac{E}{1 + \frac{\alpha R_{X0} \cdot \Delta t}{R_2 + R_{X0}}} \cdot \alpha R_{X0} \cdot \Delta t \quad (9)$$

式中的 αR_{X0} 值可由以下方法测得:

取两个温度 t_1 、 t_2 , 测得 R_{X1} , R_{X2} 则

$$\alpha R_{X0} = \frac{R_{X2} - R_{X1}}{t_2 - t_1}$$

这样可根据(9)式, 由电桥的输出 U_0 求得相应的温度变化量 Δt , 从而求得 $t=t_0+\Delta t$ 。

特殊地, 当 $\Delta R \ll R_{X0}$ 时, (9)式可简化为

$$U_0 = -\frac{R_2}{(R_2 + R_{X0})^2} \cdot E \cdot \alpha R_{X0} \cdot \Delta t \quad (10)$$

这时 U_0 与 Δt 成线性关系

2、利用热敏电阻测温度

半导体热敏电阻具有负的电阻温度系数, 电阻值随温度升高而迅速下降, 这是因为热敏电阻由一些金属氧化物如 Fe_3O_4 、 $MgCr_2O_4$ 等半导体制成, 在这些半导体内部, 自由电子数目随温度的升高增加得很快, 导电能力很快增强; 虽然原子振动也会加剧并阻碍电子的运动, 但这种作用对导电性能的影响远小于电子被释放而改变导电性能的作用, 所以温度上升会使电阻值迅速下降。热敏电阻的电阻温度特性可以用下述指数函数来描述:

$$R_T = A e^{\frac{B}{T}} \quad (11)$$

式中 A 是与材料性质的电阻器几何形状有关的常数。 B 为与材料半导体性质有关的常数, T 为绝对温度。

为了求得准确的 A 和 B , 可将式(11)两边取对数

$$\ln R_T = \ln A + \frac{B}{T} \quad (12)$$

选取不同的温度 T , 得到不同的 R_T 。

根据(12)式, 当 $T=T_1$ 时有:

$$\ln R_{T1} = \ln A + B/T_1;$$

$T=T_2$ 时有:

$$\ln R_{T2} = \ln A + B/T_2$$

将上两式相减后得到

$$B = \frac{\ln R_{T1} - \ln R_{T2}}{1/T_1 - 1/T_2} \quad (13)$$

将(13)代入(11)可得

$$A = R_{T1} e^{-\frac{B}{T_1}} \quad (14)$$

常用半导体热敏电阻的 B 值约为 $1500 \sim 5000K$ 之间。

不同的温度时 R_T 有不同的值, 电桥的 U_0 也会有相应的变化。可以根据 U_0 与 T 的函数关系, 经标定后, 用 U_0 测量温度 T , 但这时 U_0 与 T 的关系是非线性的, 显示和使用不是很方便。这就需要对热敏电阻进行线性化。线性化的方法很多, 常见的有:

①串联法。通过选取一个合适的低温度系数的电阻与热敏电阻串联, 就

可使温度与电阻的倒数成线性关系；再用恒压源构成测量电源，就可使测量电流与温度成线性关系；

②串并联法。在热敏电阻两端串并联电阻。总电阻是温度的函数,在选定的温度点进行级数展开，并令展开式的二次项为 0，忽略高次项,从而求得串并联电阻的阻值，这样就可使总电阻与温度成正比，展开温度常为测量范围的中间温度，详细推导可由学生自己完成；

③非平衡电桥法。选择合适的电桥参数，可使电桥输出与温度在一定的范围内成近似的线性关系；

④用运算放大的结合电阻网络进行转换，使输出电压与温度成一定的线性关系。

这里我们重点讲述一下用非平衡电桥进行线性化设计的方法。

在图一中， R_1 、 R_2 、 R_3 为桥臂测量电阻，具有很小的温度系数， R_x 为热敏电阻，由于只检测电桥的输出电压，故 R_L 开路，根据（2）式有

$$U_0 = \left(\frac{R_x}{R_2 + R_x} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) \cdot E$$

$$\text{式中 } R_x = A e^{\frac{B}{T}}$$

可见 U_0 是温度 T 的函数,将 U_0 在需要测量的温度范围的中点温度 T_1 处，按泰勒级数展开

$$U_0 = U_{01} + U'_0(T - T_1) + U_n \quad (15)$$

$$\text{其中 } U_n = \frac{1}{2} U''_0(T - T_1)^2 + \sum_{n=3}^{\infty} \frac{1}{n!} U^{(n)}_0(T - T_1)^n$$

式中 U_{01} 为常数项，不随温度变化。 $U'_0(T - T_1)$ 为线性项， U_n 代表所有的非线性项，它的值越小越好，为此令 $U''_0 = 0$ ，则 U_n 的三次项可看作是非线性项，从 U_n 的四次项开始数值很小，可以忽略不计。

（15）式中 U_0 的一阶导数为

$$U'_0 = \left(\frac{R_x}{R_2 + R_x} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) \cdot E$$

将 $R_x = A e^{\frac{B}{T}}$ 代入上式并展开求导可得：

$$U'_0 = - \frac{B R_2 A e^{\frac{B}{T}}}{(R_2 + A e^{\frac{B}{T}})^2 T^2} \cdot E$$

U_0 的二阶导数为

$$U''_0 = \left\{ - \frac{B R_2 A e^{\frac{B}{T}}}{(R_2 + A e^{\frac{B}{T}})^2 T^2} \cdot E \right\}'$$

$$= \frac{BR_2 Ae^{\frac{B}{T}}}{(R_2 + Ae^{\frac{B}{T}})^3 T^4} \left\{ R_2(B + 2T) - (B - 2T)Ae^{\frac{B}{T}} \right\} \cdot E$$

令 $U''_0 = 0$, 可得:

$$\begin{aligned} R_2(B + 2T) - (B - 2T)Ae^{\frac{B}{T}} &= 0 \\ \text{即 } Ae^{\frac{B}{T}} &= \frac{B + 2T}{B - 2T} \cdot R_2 \\ \text{也就是 } R_x &= \frac{B + 2T}{B - 2T} \cdot R_2 \end{aligned} \quad (16)$$

根据以上的分析, 将 (15) 改为如下表达式:

$$U_0 = \lambda + m(t - t_1) + n(t - t_1)^3 \quad (17)$$

式中 t 和 t_1 分别 T 和 T_1 对应的摄氏温度, 线性函数部分为:

$$U_0 = \lambda + m(t - t_1) \quad (18)$$

式中的 λ 为 U_0 在温度 T_1 时的值:

$$\lambda = U_0 = \left(\frac{R_{x(T_1)}}{R_2 + R_{x(T_1)}} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) \cdot E$$

将 $R_{x(T_1)} = Ae^{\frac{B}{T_1}} = \frac{B + 2T_1}{B - 2T_1} R_2$ 代入上式, 可得:

$$\lambda = \left(\frac{B + 2T_1}{2B} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) \cdot E \quad (19)$$

(18) 式中 m 的值为 U'_0 在温度 T_1 时的值:

$$m = U'_0 = - \frac{BR_2 Ae^{\frac{B}{T_1}}}{(R_2 + Ae^{\frac{B}{T_1}})^2 T_1^2} \cdot E$$

将 $R_{x(T_1)} = Ae^{\frac{B}{T_1}} = \frac{B + 2T_1}{B - 2T_1} R_2$ 代入上式, 可得:

$$m = \left(\frac{4T_1^2 - B^2}{4BT_1^2} \right) \cdot E \quad (20)$$

非线性部分为 $n(t - t_1)^3$ 是系统误差, 这里忽略不计。

线性化设计的过程如下:

根据给定的温度范围确定 T_1 的值, 一般为温度中间值, 例如设计一个 30.0~50.0℃ 的数字表, 则 T_1 选 313K, 即 $t_1 = 40.0^\circ\text{C}$ 。 B 值由热敏电阻的特性决定, 可根据 (13) 式所述求得。

确定 m 值后, E 的值由公式 (20) 可求得:

由公式 (16) 可得:

R_2 的值可取 T_1 温度时的 R_{xT_1} 值计算:

由公式 (19) 可得:

这样选定 λ 值后,就可求得 R_1 与 R_3 的比值。选好 R_1 与 R_3 的比值后,根据 R_1 与 R_3 的阻值可调范围,确定 R_1 与 R_3 的值。

非平衡电桥和 DHW-1/DHW-2/DHT-2 型多功能恒温实验仪的使用操作详见说明书。

1、预调电桥平衡

起始温度可以选室温或测量范围内的其他温度。

选等臂电桥或卧式电桥做一组 U_0 、 ΔR 数据。将 DHW-1/DHW-2 型温度传感实验装置或 DHT-2 热学实验仪的“铜电阻”端接到非平衡电桥输入端。调节合适的桥臂电阻,使 $U_0=0$,测出 $R_{X0}=\quad\quad\quad\Omega$,并记下初始温度 $t_0=\quad\quad\quad^\circ\text{C}$ 。

2、调节控温仪，使铜电阻升温，根据数字温控表的显示温度，读取相应

每隔一定温度测量一次，记录于表 1。

表 1

[illegible]

铜电阻 R_x											
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

3、根据测量结果作 R_x-t 曲线,由图求出 $\alpha = \frac{\Delta R}{R} \cdot \Delta t$, 试与理论值比较,并作图求出某一温度_____°C时的电阻值 $R_x(^{\circ}\text{C}) = \underline{\hspace{2cm}}$ Ω

4*、用立式电桥或比例电桥, 重复以上步骤, ΔR 的值根据下式求得:

$$\Delta R = \frac{(R_2 + R_{X0})^2 \cdot U_0}{R_2 E - (R_2 + R_{X0}) U_0}$$

做一组数据, 列入表 2

表 2

温度 (°C)											
U_0 (mV)											
ΔR											
铜电阻 R_x											

5、根据电桥的测量结果作 R_x-t 曲线, 试与前一曲线比较

6、分析以上测量的误差大小, 并讨论原因。

(二)、用铜电阻测量温度

根据前面的实验结果, 由公式 (9) 可得:

$$\Delta t = \frac{(R_2 + R_{X0})^2}{R_2 E - (R_2 + R_{X0}) U_0} \cdot \frac{U_0}{\alpha R_{X0}} \quad (24)$$

用等臂电桥或卧式电桥实验时则简化为:

$$\Delta t = \frac{4}{E - 2U_0} \cdot \frac{U_0}{\alpha} \quad (25)$$

实际的 α 值根据公式 $\alpha R_{X0} = \frac{R_{X2} - R_{X1}}{t_2 - t_1}$ 可得:

$$\alpha = \frac{R_{X2} - R_{X1}}{(t_2 - t_1) R_{X0}}$$

取两个温度 t_1 、 t_2 , 测得 R_{X1} , R_{X2} 则可求得 α 。

这样可根据 (24) 或 (25) 式, 由电桥的输出 U_0 求得相应的温度变化量 Δt , 从而求得: $t=t_0+\Delta t$ 。

根据测量结果作 U_0-t 曲线。

(三)、用非平衡电桥测温度

选 $2.7\text{K}\Omega$ 的热敏电阻, 设计的温度测量范围为 $30.0\sim 50.0^{\circ}\text{C}$ (夏天室温较高时, 也可以将设计温度适当提高, 例如改为 $35\sim 55^{\circ}\text{C}$ 、 $40\sim 60^{\circ}\text{C}$)。

1、在测量温度之前, 先要获得热敏电阻的温度特性。为了获得较为准确

的电阻测量值，我们可以用单臂电桥测量不同温度下的热敏电阻值。

将 DHW-1/ DHW-2 型温度传感实验装置或 DHT-2 热学实验仪的“热敏电阻”端接到电桥的 R_X 端，用单电桥测量，一般取 5 位有效数字即可。调节控温仪，使热敏电阻升温。每隔一定温度，测出 R_X ，并记下相应的温度 t 于表 3。

表 3

温度 (°C)		30	35	40	45	50	55	60	
热敏电阻 R_X									

2、根据表 3 测得的数据，绘制 $\ln R_T - 1/T$ 曲线，并根据公式 (13)、(14) 求得 $A = \underline{\hspace{2cm}}$ 和 $B = \underline{\hspace{2cm}}$ ，注意：这里的 $T = (273 + t) \text{ K}$ 。

3、根据非平衡电桥的表头，选择 λ 和 m ，根据 (20) 式计算可知 m 为负值，相应的 λ 也为负值。本实验如使用 2V 表头，可选 m 为 $-10\text{mV}/^\circ\text{C}$ ， λ 为测温范围的中心值 -400mV ，这样该数字温度计的分辨率为 0.01°C 。

4、按 (21) 式求得 $E = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$ 。调节“电压调节”旋钮，将“数字表输入”端用导线接至“电源输出”，接通“G”按钮，用数字表头的合适量程进行测量，调节电源电压 E 为所需值。保持电位器位置不变，“数字表输入”端用测量导线接至电桥的输出端，即面板上 G 两端的插孔中，这时非平衡电桥的 E 已调好。

5、按 (22) 式求得 $R_2 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$ 。按 (23) 式求得 $R_1/R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ ，根据 R_1 、 R_3 的阻值范围确定 $R_1 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$ （可选 100Ω ）， $R_3 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$ 。

6、按求得的 R_1 、 R_2 、 R_3 值，接好非平衡电桥电路。设定温度 $t = 40.0^\circ\text{C}$ ，待温度稳定后，电桥应输出 $U_0 = -400\text{mV}$ 。如果不为 -400mV ，再微调 R_2 、 R_3 值。最后的 $R_1 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$ ， $R_2 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$ ， $R_3 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$ 。

7、在 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ 的温度测量范围内测量 U_0 与 t 的关系，并作记录。

8、对 $U_0 - t$ 关系作图并直线拟合，检查该温度测量系统的线性和误差。

9、在 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ 的温度测量范围内任意设定加热装置的几个温度点作为未知温度，用该温度计测量这些未知温度，并计算误差。

六、思考题

1、非平衡电桥与平衡电桥有何异同？

2、用非平衡电桥设计热敏电阻温度计有什么特点？所测温度的范围受那些因素限制？

附录 1 功率电桥的输出

当非平衡电桥的输出端接有一定阻值的负载时，电桥将输出一定的功率，这时称为功率电桥。输出电压为 (3) 式，即

$$U_0 = U_0 = \frac{R_L}{R_i + R_L} \cdot \frac{\Delta R \cdot R_1}{(R_2 + R_{X0} + \Delta R)(R_1 + R_3)} \cdot E \tag{26}$$

其中
$$R_i = \frac{R_2 R_X}{R_2 + R_X} + \frac{R_3 R_1}{R_1 + R_3}$$

可见这时的输出电压降低了，所以电桥的电压测量灵敏度降低了。

输出电流为

$$I_0 = \frac{1}{R_i + R_L} \cdot \frac{\Delta R \cdot R_1}{(R_2 + R_{X0} + \Delta R)(R_1 + R_3)} \cdot E \quad (27)$$

输出功率为

$$P = U_L \cdot I_0 = \frac{R_L}{(R_i + R_L)^2} \cdot \left[\frac{\Delta R \cdot R_1}{(R_2 + R_{X0} + \Delta R)(R_1 + R_3)} \right]^2 \cdot E^2 \quad (28)$$

当 $R_L = R_i$ 时， P 有最大值 P_m

$$P_m = \frac{1}{4R_i} \cdot \left[\frac{\Delta R \cdot R_1}{(R_2 + R_{X0} + \Delta R)(R_1 + R_3)} \right]^2 \cdot E^2 \quad (29)$$

下面分别讨论 $R_L = R_i$ 时各种桥路的输出情况

1、等臂电桥

$$U_L = \frac{E}{8R_{X0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{2R_{X0}}} \cdot \Delta R \quad (30)$$

$$I_0 = \frac{E}{8R_{X0}^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{2R_{X0}}} \cdot \Delta R \quad (31)$$

$$P_m = \frac{E^2}{64R_{X0}^3} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta R}{2R_{X0}}\right)^2} \cdot \Delta R^2 \quad (32)$$

2、卧式电桥

$$U_L = \frac{E}{8R_{X0}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{2R_{X0}}} \cdot \Delta R \quad (33)$$

$$I_0 = \frac{E}{4R_{X0}(R_{X0} + R_3)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{2R_{X0}}} \cdot \Delta R \quad (34)$$

$$P_m = \frac{E^2}{32R_{X0}^2(R_{X0} + R_3)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta R}{2R_{X0}}\right)^2} \cdot \Delta R^2 \quad (35)$$

3、立式电桥和比例电桥

$$U_L = \frac{E}{2} \cdot \frac{R_2}{(R_2 + R_{X0})^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{R_2 + R_{X0}}} \cdot \Delta R$$

(36)

$$I_o = -\frac{U_L}{R_L} = \frac{U_L}{R_i} \quad (37)$$

$$P_m = U_L \cdot I_o = \frac{U_L^2}{R_i} \quad (38)$$

其中

$$R_i = \frac{R_2 R_x}{R_2 + R_x} + \frac{R_3 R_1}{R_1 + R_3}$$

可见，当 $\Delta R \ll R_{x0}$ 时，则 U_L 、 I_o 与 ΔR 成线性关系， P_m 与 ΔR^2 成线性关系。且当 $R_L \neq R_i$ 时， U_L 、 I_o 与 ΔR 仍成线性关系。故在功率电桥情况下，仍可用输出电压、输出电流和输出功率来测得 ΔR 的值。