

实验四 直流电桥的原理和应用

【背景知识】

直流电桥是一种精密的电阻测量仪器，具有重要的应用价值。按电桥的测量方式可分为平衡电桥和非平衡电桥。平衡电桥是把待测电阻与标准电阻进行比较，通过调节电桥平衡，从而测得待测电阻值，如单臂直流电桥（惠斯登电桥）、双臂直流电桥（开尔文电桥）；非平衡电桥则是通过测量电桥输出（电压、电流、功率等）并进行运算处理，得到待测电阻值。

直流电桥还可用于测量引起电阻变化的其它物理量，如温度、压力、形变等，在检测技术、传感器技术中的应用非常广泛。平衡电桥只能用于测量具有相对稳定状态的物理量，而在实际工程和科学实验中，很多物理量是连续变化的，只能采用非平衡电桥才能测量。

【实验目的】

本实验采用 FQJ 型教学用非平衡直流电桥，该仪器集单臂、非平衡电桥于一体，通过本实验能掌握以下内容：

- (1) 直流单臂电桥（惠斯通电桥）测量电阻的基本原理和操作方法；
- (2) 非平衡直流电桥电压输出方法测量电阻的基本原理和操作方法；
- (3) 根据不同待测电阻选择不同桥式和桥臂电阻的初步方法。

【实验原理】

1. 平衡电桥

单臂直流电桥是平衡电桥，又称惠斯通电桥，其电路见图 4.4.1。其中 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 构成一电桥， A 、 C 两端加一恒定桥压 U_S ， B 、 D 之间有一检流计 PA ，当电桥平衡时， B 、 D 两点为等电位， PA 中无电流流过，此时有 $U_{AB} = U_{AD}$ ， $I_1 = I_4$ ， $I_2 = I_3$ ，于是有

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (4.4.1)$$

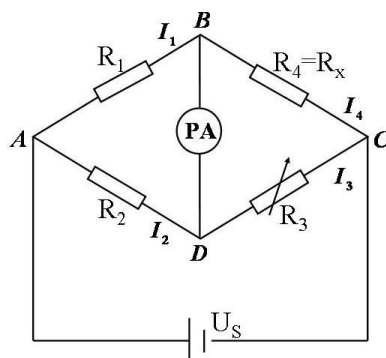


图 4.4.1 惠斯通电桥

如果 R_4 为待测电阻 R_x ， R_3 为标准比较电阻，则有

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3 = K \cdot R_3 \quad (4.4.2)$$

其中 $K = R_1 / R_2$ ，称其为比率（一般惠斯登电桥的 K 有 0.001、0.01、0.1、1、10、100、1000 等。本电桥的比率 K 可以任选）。根据待测电阻大小，选择 K 后，只要调节 R_3 ，使电桥平衡，检流计为 0，就可以根据（4.4.2）式得到待测电阻 R_x 之值。

2. 非平衡电桥

非平衡电桥原理如图 4.4.2 所示： B 、 D 之间为一负载电阻 R_g ，只要测量电桥输出 U_g 、 I_g ，就可得到 R_x 值。根据电桥各臂电阻关系可将非平衡电桥分为三类：

（1）等臂电桥： $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ；

（2）输出对称电桥（卧式电桥）： $R_1 = R_4 = R$ ，

$R_2 = R_3 = R'$ ，且 $R \neq R'$ ；

（3）电源对称电桥（立式电桥）： $R_1 = R_2 = R'$ ， $R_3 = R_4 = R$ ，且 $R \neq R'$ 。

当负载电阻 $R_g \rightarrow \infty$ ，即电桥输出处于开路状态时， $I_g = 0$ ，仅有电压输出，在此用 U_0 表示，根据分压原理， ABC 半桥的电压降为 U_s ，通过 R_1 、 R_4 两臂及 R_2 、 R_3 两臂的电流为：

$$I_1 = I_4 = \frac{U_s}{R_1 + R_4}, \quad I_2 = I_3 = \frac{U_s}{R_2 + R_3}, \quad (4.4.3)$$

则输出电压 U_0 为

$$U_0 = U_{BC} - U_{DC} = \frac{R_4}{R_1 + R_4} \cdot U_s - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_s = \frac{(R_2 \cdot R_4 - R_1 \cdot R_3)}{(R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)} \cdot U_s \quad (4.4.4)$$

当满足条件

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad (4.4.5)$$

时，电桥输出 $U_0 = 0$ ，即电桥处于平衡状态。（4.4.5）式称为电桥的平衡条件。为了测量的准确性，在测量的起始点，电桥必须调至平衡，称为预调平衡。这样可使输出只与某一臂电阻变化有关。

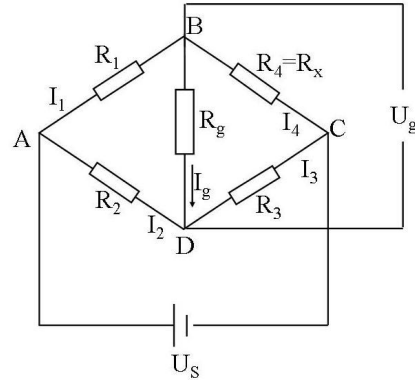


图 4.4.2 非平衡电桥

若 R_1 、 R_2 、 R_3 固定， R_4 为待测电阻，并且其阻值随某非电量 x （如温度、压力等）变化而变化，即 $R_4 = R(x)$ 。若预调平衡后 x 发生变化，导致 R_4 随之变为 $R_4 + \Delta R(x)$ ，此时因电桥不平衡而产生的电压输出为：

$$U_0 = \frac{R_2 \cdot R_4 + R_2 \cdot \Delta R(x) - R_1 \cdot R_3}{(R_1 + R_4 + \Delta R(x)) \cdot (R_2 + R_3)} \cdot U_s \quad (4.4.6)$$

考虑到测量开始时已预调平衡，应该有 $R_2 \cdot R_4 = R_1 \cdot R_3$ 上式化为：

$$U_0 = \frac{R_2 \cdot \Delta R(x)}{(R_1 + R_4 + \Delta R(x)) \cdot (R_2 + R_3)} \cdot U_s \quad (4.4.7)$$

为简便起见，可根据电阻变化率 $\Delta R(x)$ 大小不同，导出不同情况下的电桥电压输出表达式。

先分别讨论如下：

（1）若电阻变化较小时，即满足 $\Delta R \ll (R_1 + R_4)$ 时，公式（4.4.7）分母中的 ΔR 项可略去，此时各种电桥的输出电压公式为：

$$\text{等臂电桥} \quad U_0 = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R(x)}{R} \quad (4.4.8)$$

$$\text{卧式电桥} \quad U_0 = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R(x)}{R} \quad (4.4.9)$$

$$\text{立式电桥} \quad U_0 = \frac{R \cdot R'}{(R + R')^2} \cdot \frac{\Delta R(x)}{R} \cdot U_s \quad (4.4.10)$$

注意：上式中的 R 和其 R' 均为预调平衡后的电阻。当 $\Delta R(x)$ 较小时，测量得到电压输出与 $\Delta R(x)/R$ 成线性比例关系。测得输出电压后，可通过上述公式运算得 $\Delta R(x)/R$ 或 $\Delta R(x)$ ，从而求得 $R(x) = R + \Delta R(x)$ 。

同时由（4.4.8）～（4.4.10）式可知，在 R 、 $\Delta R(x)$ 相同的情况下，等臂电桥、卧式电桥输出电压比立式电桥高，因此灵敏度也高，但立式电桥测量范围大，可以通过选择 R 、 R' 来扩大测量范围， R 、 R' 差距愈大，测量范围也愈大。

（2）若电阻变化很大，即 $\Delta R \ll (R_1 + R_2)$ 条件不成立时，上面的近似公式不再适用。此时利用精确公式（4.4.7）可得各种桥式电桥的输出电压公式：

$$\text{等臂电桥} \quad U_0(x) = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R(x)}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R(x)}{R}} \quad (4.4.11)$$

$$\text{卧式电桥} \quad U_0(x) = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R(x)}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R(x)}{R}} \quad (4.4.12)$$

$$\text{立式电桥} \quad U_0(x) = U_s \cdot \frac{RR'}{(R+R')^2} \cdot \frac{\Delta R(x)}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R(x)}{R+R'}} \quad (4.4.13)$$

【实验仪器】

1. FQJ 型教学用非平衡电桥

FQJ 型非平衡电桥是专门为教学实验而设计的，该仪器集单臂、非平衡电桥于一体，其面板如图 4.4.3。

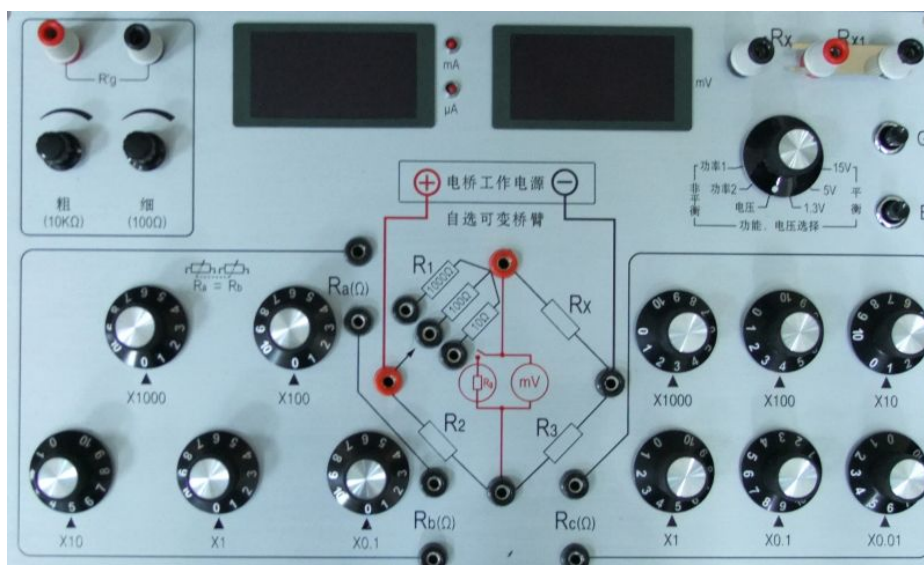


图 4.4.3 FQJ 型非平衡电桥面板

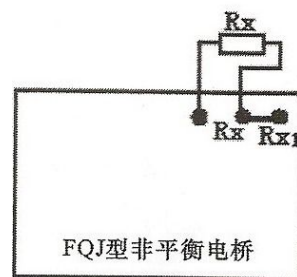


图 4.4.4 待测电阻接法

整个仪器的核心部分为面板中部的桥式电路，其中 R_1 、 R_2 和 R_3 可选用本仪器配备的可调电阻箱 (R_a 、 R_b 、 R_c)， R_1 也可以选用内部装有的标准电阻，有 1000Ω 、 100Ω 、 10Ω 三个阻值可供选择，而 R_x 处接待测电阻，它的两个接线柱与仪器右上角的 R_x 接线柱连通，因此也可以将待测电阻接在右上角的接线柱上（如图 4.4.4）。

R_a 、 R_b 、 R_c 为可调电阻箱，可根据不同的桥式选择使用。其中 R_a 、 R_b 为两组同轴电阻箱，共用五个十进位旋钮调节，保证 $R_a = R_b$ ，调节范围 $0 \sim 11.1110\text{k}\Omega$ ； R_c 包含六个十进位旋钮，调节范围 $0 \sim 11.11110\text{k}\Omega$ 。

电桥工作状态可由“功率、电压选择”旋钮调节。该旋钮中“平衡”区有三档电压供单臂电桥测量时选用。“非平衡”区也有三档，其中“电压”档表示电桥“桥”上的“ R_g ”可认为是无穷大，不消耗功率；“功率1”测量小电阻时用，采样电阻“ R_s ”为 10Ω ， R'_g 内部线已联通，阻值可调；“功率2”测量大电阻时用，采样电阻“ R_s ”为 1000Ω ， R'_g 内部线已联通，阻值可调。“电压”、“功率1”、“功率2”三档的工作电压均为 $1.3V$ 。

该仪器还设有 G、B 两个按钮，G 按钮是数字电表控制开关，B 按钮是电桥电源开关。

2. FQJ 非平衡电桥加热实验装置

该装置由加热炉及温度控制仪两大部分组成。其结构及连接见下图。



图 4.4.5 加热炉、温度控制仪实物照片及连接方法

加热：“加热选择”开关分为“1、2、3”三档，由“断”位置转到任意一档，即开始加热，升温的高低及速度以“1”档为最低，“3”档为最高、最快。加热升温时，应根据实际升温需求，选择加热档位。

降温：实验过程中或实验完毕，可能需要对加热铜块或加热炉体降温，此时可以开启控温仪面板上的“风扇开关”使炉体底部的风扇转动，达到使炉体加快降温的目的。

3. 待测电阻

(1) Cu50 型铜电阻

这是一种线性电阻，具有正的温度系数 $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ ， R_0 为 $t = 0^\circ\text{C}$ 时的阻值， α 为

温度系数，其理论值 $\alpha = 0.004280/^\circ\text{C}$ 。

(2) 热敏电阻

本实验采用 $2.7K\Omega MF51$ 型半导体热敏电阻。该电阻是由一些过渡金属氧化物（主要用 Mn, Co, Ni, Fe 等氧化物）在一定的烧结条件下形成的半导体金属氧化物作为基本材料制成，具有 P 型半导体的特性，对于一般半导体材料，电阻率随温度变化主要依赖于载流子浓度，而迁移率随温度的变化相对来说可以忽略。但上述过渡金属氧化物则有所不同，在室温范围内基本上已全部电离，即载流子浓度基本上与温度无关，此时主要考虑迁移率与温度的关系。随着温度升高，迁移率增加，电阻率下降，故这类金属氧化物半导体是一种具有负温度系数的热敏电阻元件，其电阻-温度特性见表 4.4.1。根据理论分析，其电阻-温度特性的数学表达式通常可表示为

$$R_t = R_{25} \exp[B_n(1/T - 1/298)] \quad (4.4.14)$$

式中， R_{25}, R_t 分别为 25°C 和 $t^\circ\text{C}$ 时热敏电阻的电阻值； $T = 273 + t$ ； B_n 为材料常数，制作时不同的处理方法其值不同。对于确定的热敏电阻，可以由实验测得的电阻-温度曲线求得。我们也可以把上式写成比较简单的表达式

$$R_t = R_0 \cdot e^{\frac{E}{k \cdot T}} = R_0 \cdot e^{\frac{B_n}{T}} \quad (4.4.15)$$

式中 $R_0 = R_{25} \cdot e^{\frac{-B_n}{298}}$ ， k 为玻尔兹曼常数 ($k = 1.3806 \times 10^{-23}$ 焦耳/开尔文)。热敏电阻之阻值 R_t 与 t 为指数关系，是一种典型的非线性电阻。

表 4.4.1 $2.7K\Omega MF51$ 型热敏电阻的电阻-温度特性（供参考）

温度 ($^\circ\text{C}$)	25	30	35	40	45	50	55	60	65
电阻 (Ω)	2700	2225	1870	1573	1341	1160	1000	868	748

【实验内容】

1. 用惠斯登电桥测量铜电阻

- (1) 连接线路（如图 4.4.6）；
- (2) 选择适当的 R_1 ，同时调节 R_b (R_2) 使 $R_1/R_2 = 0.1$ ，将转换开关置于“平衡”，电压选择 5V；

- (3) 按下 G、B 开关，调节 R_3 (R_c)，使电桥平衡（电流表为零），记录室温和室温下电阻值，
- 然后开始升温，每隔 3°C 测一个点，记录电阻值和相应温度，共测 10 个点，自行设计数据表格。

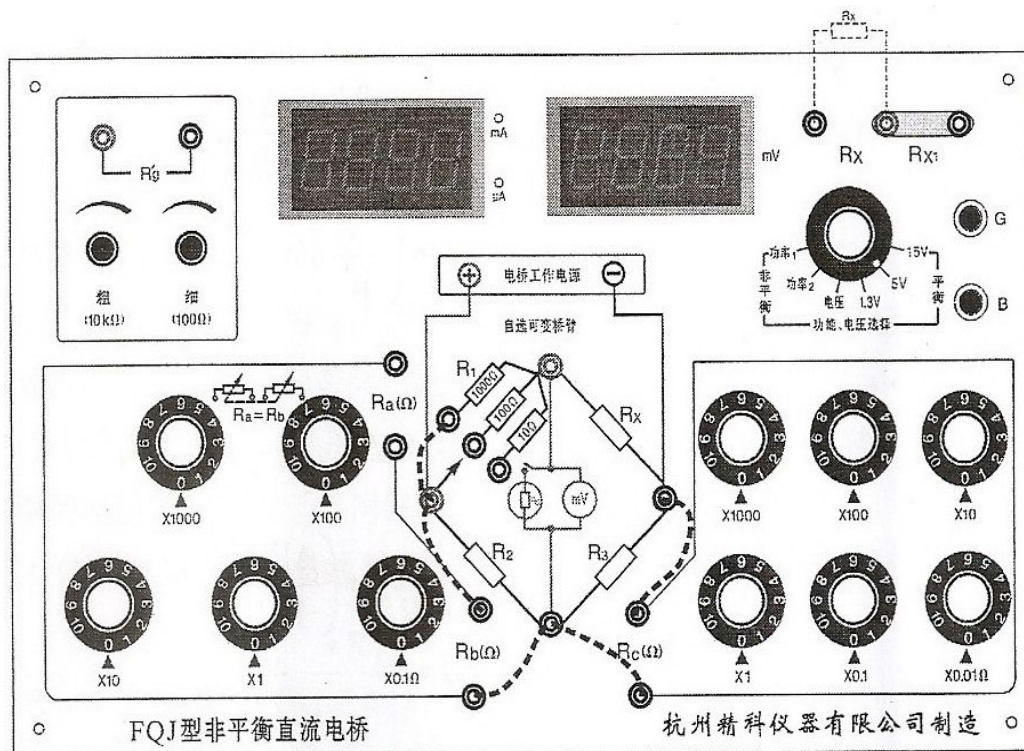


图 4.4.6 惠斯通电桥电路连接图

2. 用卧式电桥测量铜电阻

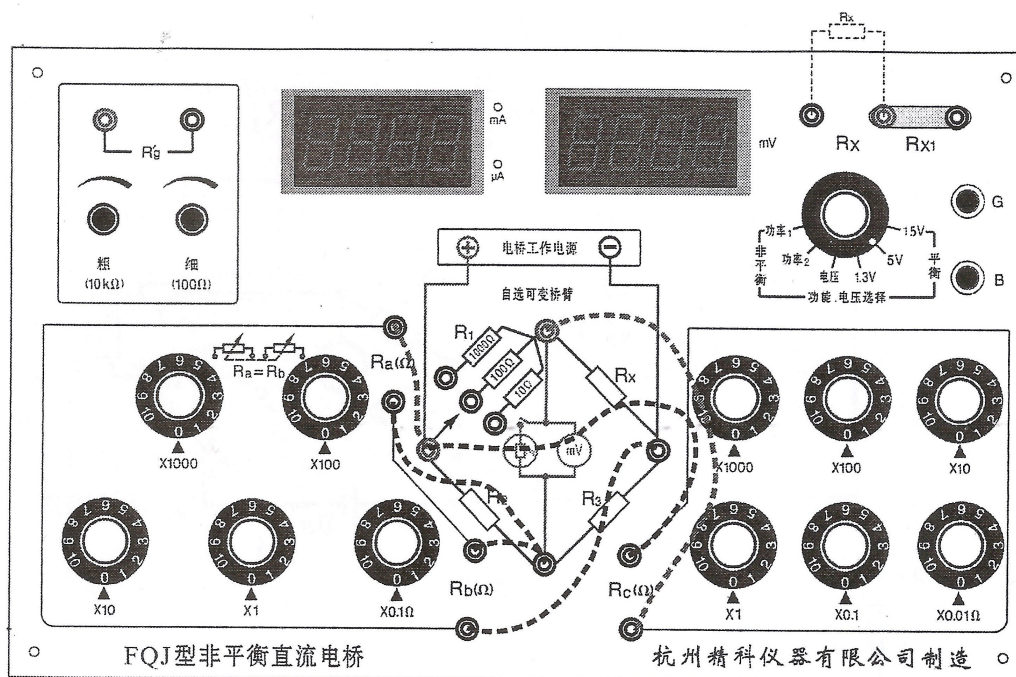


图 4.4.7 卧式电桥电路连接图

- (1) 按图 4.4.7 连接线路;
- (2) 调节桥臂电阻值使 $R' = R_2 = R_3 = 50\Omega$ (供参考, 可自行设计);
- (3) 预调平衡, 将待测电阻接至 R_x , 功能转换开关转至电压输出, G、B 开关按下, 调节 R_1 (R_c) 使电压 $U_0 = 0$, 记下此时的温度和 R_1 值;
- (4) 开始升温, 每隔 3°C 测一个点, 记录电压值和相应的温度, 共测十个点。

3. 用立式电桥测量热敏电阻

考虑到热敏电阻的阻值随温度变化较大, 这部分测量采用立式电桥。

- (1) 如图 4.4.8 连接线路;

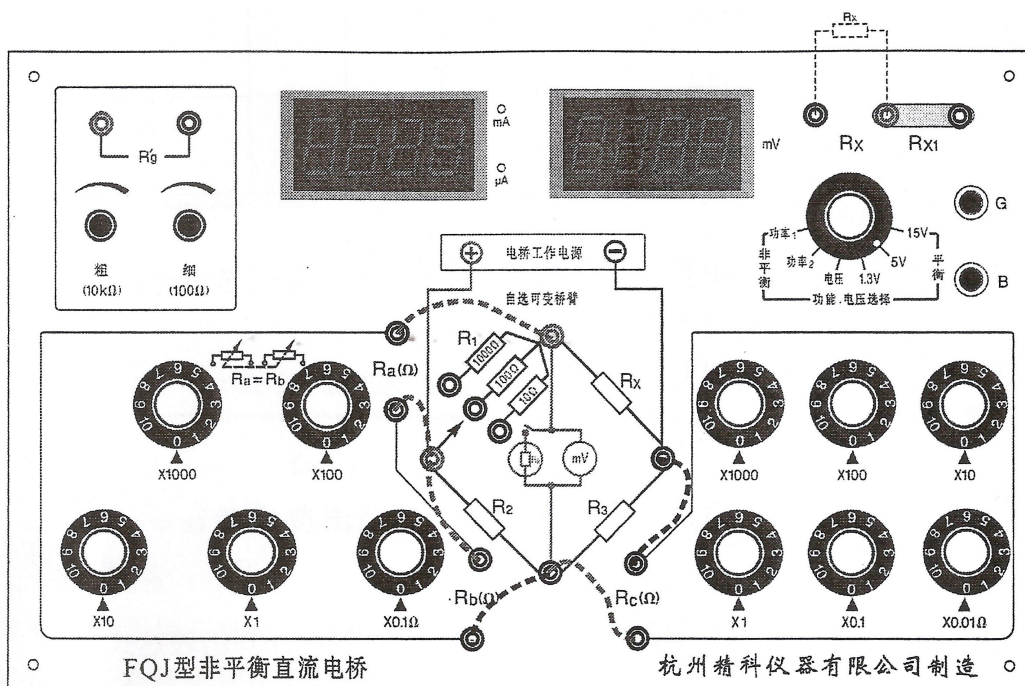


图 4.4.8 立式电桥电路连接图

- (2) 调节桥臂电阻使 $R' = R_1 = R_2 = 100\Omega$;
- (3) 预调平衡，步骤与上面类似;
- (4) 开始升温，每隔 3°C 测一个点，共测 10 个点。

【数据处理】

- (1) 根据平衡电桥测量的数据作 Cu50 型铜电阻的 $R(t) \sim t$ 曲线，由此求出电阻温度系数 α ，与理论值比较，求出百分误差，并写出表达式。
- (2) 根据由非平衡电桥测量的数据作 Cu50 型铜电阻的 $R(t) \sim t$ 曲线，用最小二乘法求 0°C 时的电阻值 R_0 和温度系数 α 。
- (3) 根据由非平衡电桥测量的数据作 MF51 型热敏电阻的 $R(T) \sim T$ 与 $\ln R(T) \sim 1/T$ 曲线，并用最小二乘法拟合曲线，求出 R_0 及材料常数 B_n ，得出经验方程。

【注意事项】

- (1) 实验开始前。所有导线，特别是加热炉与控温仪之间的信号输入线应连接可靠；
- (2) 测量前不得随意打开控温器开关，以免提前使加热炉升温，影响测量；
- (3) 传热铜块与传感器组组件，出厂时已由厂家调节好，不得随意拆卸。
- (4) 由于热敏电阻、铜电阻耐高温的局限，在设定加温的上限值时不允许超过 120°C 。
- (5) 装置在加热时，应注意关闭风扇电源。
- (6) 实验完毕后，应切断仪器工作电源。

【思考题】

- (1) 提出设计方案，将本实验提供的实验器材改造成温度计。
- (2) 非平衡电桥之立式桥为什么比卧式桥测量范围大？
- (3) 当采用立式桥测量某电阻变化时，如产生电压表溢出现象，应采取什么措施？