

## 【实验目的】

1. 掌握非平衡直流电桥的工作原理和测量方法
2. 应用非平衡直流电桥测量变温金属电阻温度系数

## 【实验原理】（电学、光学画出原理图）

### 1. 非平衡电桥工作原理

如右图，当负载电阻  $R_g \rightarrow \infty$ ，BD 处于开路状态，即  $I_g = 0$ 。

则根据分压原理， $U_{BC} = \frac{R_x}{R_1 + R_x} \cdot \mathcal{E}$ ， $U_{DC} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \mathcal{E}$  ①

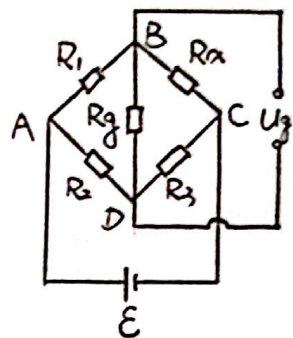
因此输出电压  $U_g = U_{BD} = U_{BC} - U_{DC} = \frac{R_2 R_x - R_1 R_3}{(R_1 + R_x)(R_2 + R_3)} \mathcal{E}$  ②

测量起始点处，调节电阻使  $R_2 R_x = R_1 R_3$ ，即  $U_g = 0$ 。这称为预调平衡。

此后， $R_1, R_2, R_3$  固定，当  $R_x$  变为  $R_x + \Delta R$  时，输出的非平衡电压为

$$U_g = \frac{R_2 R_x + R_2 \Delta R - R_1 R_3}{(R_1 + R_x + \Delta R)(R_2 + R_3)} \mathcal{E} \quad ③$$

由 ③ 式可知  $R_x$  的变化情况。



### 2. 变温金属的电阻温度系数测量原理

变温金属的电阻阻值随温度的变化关系近似为  $R_t = R_0 (1 + \alpha t)$  ④

其中  $t$  是摄氏温度， $R_0$  是  $t = 0^\circ\text{C}$  下的阻值， $\alpha$  是电阻温度系数。

当 B、D 处于开路状态，令  $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$ ， $R_x = R_t$ ，代入 ② 得 ⑤

$$U_g = \frac{\alpha t}{4 + 2\alpha t} \cdot \mathcal{E} \quad , \quad \text{即} \quad \alpha = \frac{4U_g}{t(\mathcal{E} - 2U_g)} \quad ⑥, ⑦$$

其中，⑤保证了  $t = 0^\circ\text{C}$  下  $R_2 R_x = R_1 R_3$ ，因此 ⑦ 式即为  $t = 0^\circ\text{C}$  升温到  $t$  过程中满足的关系。

又  $\mathcal{E}$  已知，因此只需测出  $U_g$  和  $t$  即可求出变温电阻的温度系数  $\alpha$ 。

### 3. 惠斯登电桥原理

如右上图中，将  $R_g$  改为检流计  $G$ 。调节  $R_3$  使  $G$  示数为 0，则此时 B、D 等势；由分压原理知  $R_2 R_x = R_1 R_3$ 。

# 【实验内容】 (重点说明)

## 1. 测量铜电阻 Cu50 温度系数

- (1) 打开 FQJ 型非平衡直流电桥开关, 如 [实验器材] 部分图中, 将  $R_a, R_b, R_c$  分别接到  $R_1, R_2, R_3$ ; 将待测铜电阻 Cu50 接到  $R_x$ .
- (2) 预调平衡: 将 "功能、电压选择" 开关置于 "非平衡-电压" 档, 将  $R_x$  置于盛有冰水混合物的液体槽中, 置  $R_1 = R_2 = R_3 = 50\Omega$ . 按下 B.G 按钮, 微调  $R_3$ , 使输出电压为 0, 此时电桥平衡. 即  $t = 0^\circ\text{C}$  时  $U_y = 0$ .  
(如果条件不允许, 则置  $R_1 = R_2 = R_3 = 50\Omega$ .)
- (3) 将 "功能、电压选择" 开关置于 "非平衡-电压" 档, 按下 B.G 按钮, 测量并记录非平衡电压值  $U$  和温度  $t$ .
- (4) 利用非平衡电桥加热装置对铜电阻进行加热, 以  $5^\circ\text{C}$  为间隔. 待示数稳定时以 (3) 操作记录  $U, t$ .

(5) 利用实验数据作  $U-t$  特性曲线, 填写表 1.

## 2. 描绘铜电阻 Cu50 的 $R_t-t$ 特性曲线

- (1) 将 "功能、电压选择" 开关置于 "平衡-5V" 档
- (2) 平衡电桥 (惠斯登电桥) 下, 有关系  $R_2 R_x = R_1 R_3$ , 即  $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3$ .  
将  $R_a, R_b, R_c$  接入  $R_1, R_2, R_3$ . 由于  $R_a = R_b$ . 因此有  $R_x = R_3$ .  
⑧  
⑨
- (3) 每隔  $5^\circ\text{C}$ , 待温度相对稳定时按下 B.G 按钮, 并迅速调节  $R_c$  使电桥平衡. 此时  $R_c$  阻值即为  $R_x$  阻值.  
读取  $R_c$  和对应的  $t$ , 记录列表 2 中.
- (4) 利用实验数据绘制  $R_t-t$  特性曲线, 由曲线算出  $\alpha$ .

# 【实验器材及注意事项】

## 1. 实验器材

- (1) FQJ 型非平衡直流电桥
- (2) 非平衡直流电桥加热实验装置

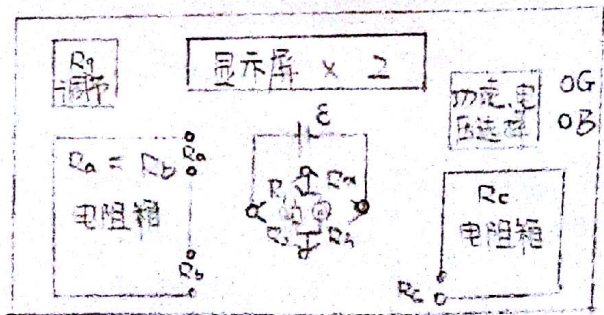
## 2. 注意事项

- (1) 实验开始前, 应保证所有导线连接可靠, 尤其是加热炉与温控仪之间的信号输入.
- (2) 传热铜块与传感器组件在出厂时已由厂家调节好, 不得随意拆卸.
- (3) 转动 "PID 调节" 及 "设定调节" 旋钮时, 不应用力过猛, 以防损坏电位器

(4) 实验完毕后, 切断电源, 整理导线, 并将实验仪器摆放整齐

(5) 由于热敏电阻、铜电阻耐高温的局限, 设定加温的上限值不能超过  $120^\circ\text{C}$ .

实验器材简图



### 【数据处理与结果】

#### 1. 测量铜电阻 Cu50 温度系数

观测值：温度  $t$ ，非平衡电压  $U_g$ ；计算值：温度系数  $\alpha = \frac{4U_g}{t(E - 2U_g)}$  ⑦

( $E$  是已知值 1.3V，式⑦的推导参见 [实验原理] 2)

表 1

次数	1	2	3	4	5	6	7	8
$t/^\circ\text{C}$	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0
$U_g/\text{mV}$	41.5	47.5	53.6	59.5	65.3	70.8	76.4	81.8
$\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$	0.004547	0.004505	0.004494	0.004478	0.004467	0.004445	0.004440	0.004430

$U_g - t$  特性曲线见附图 1。由资料， $\alpha$  的理论值  $\alpha_0 = 0.004280^\circ\text{C}^{-1}$  ⑩

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^8 \alpha_i}{8} = 0.004476^\circ\text{C}^{-1} \quad E = \frac{|\bar{\alpha} - \alpha_0|}{\alpha_0} = 0.05 = 5\% \quad \text{⑪, ⑫}$$

#### 2. 描绘铜电阻 Cu50 电阻温度特性曲线 $R_t - t$

观测值：温度  $t$ ，电桥平衡时  $R_c$  的阻值；

计算值： $R_t = R_c$  (式④，推导参见 [实验内容] 2. (2)) ⑨

根据  $R_t - t$  曲线，由  $R_t = R_0(1 + \alpha t)$  (式④) 计算  $\alpha$ 。

表 2

次数	1	2	3	4	5	6	7	8
$t/^\circ\text{C}$	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0
$R_t = R_c/\Omega$	56.81	57.90	58.99	60.10	61.15	62.28	63.34	64.43

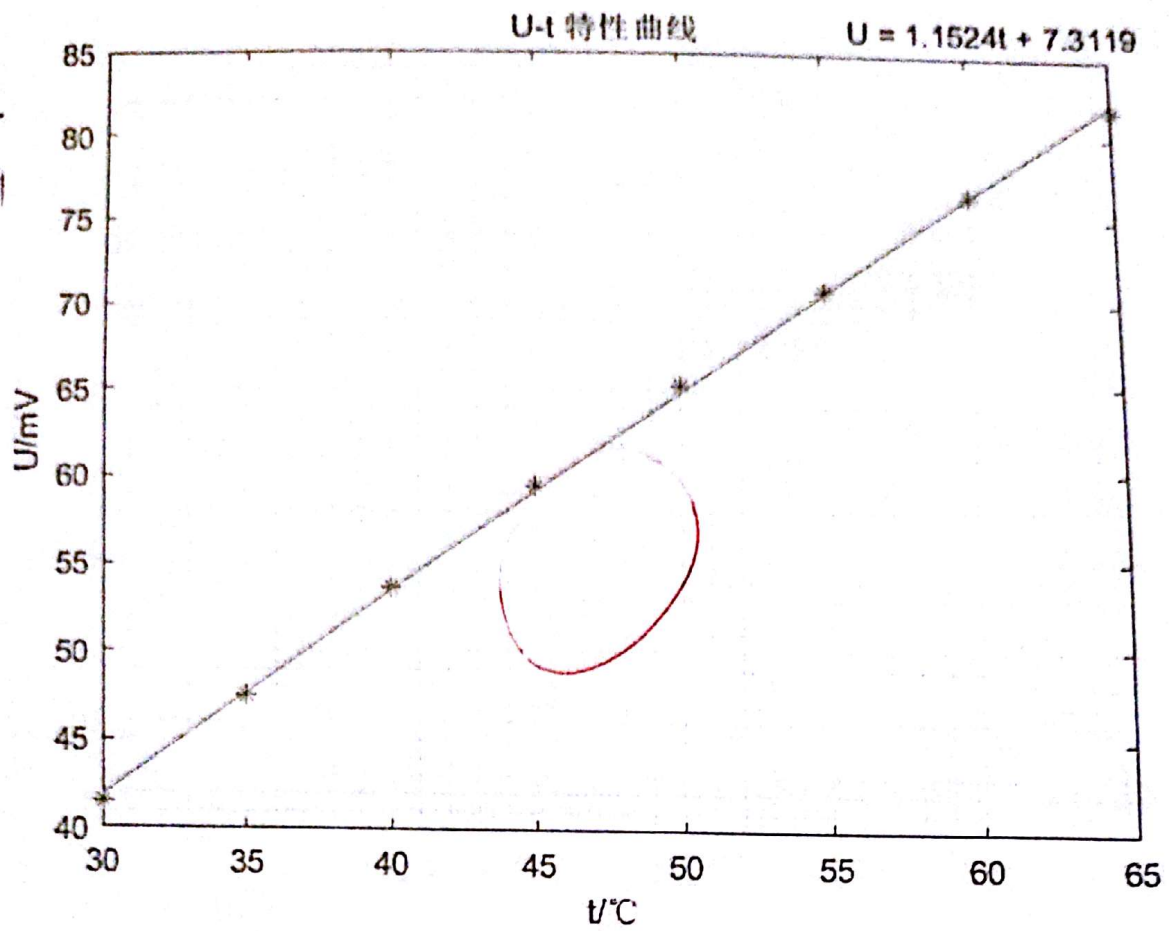
经计算机拟合， $R_t = 0.2178t + 50.2813$  (SI) ⑬

$R_t - t$  特性曲线见附图 2。

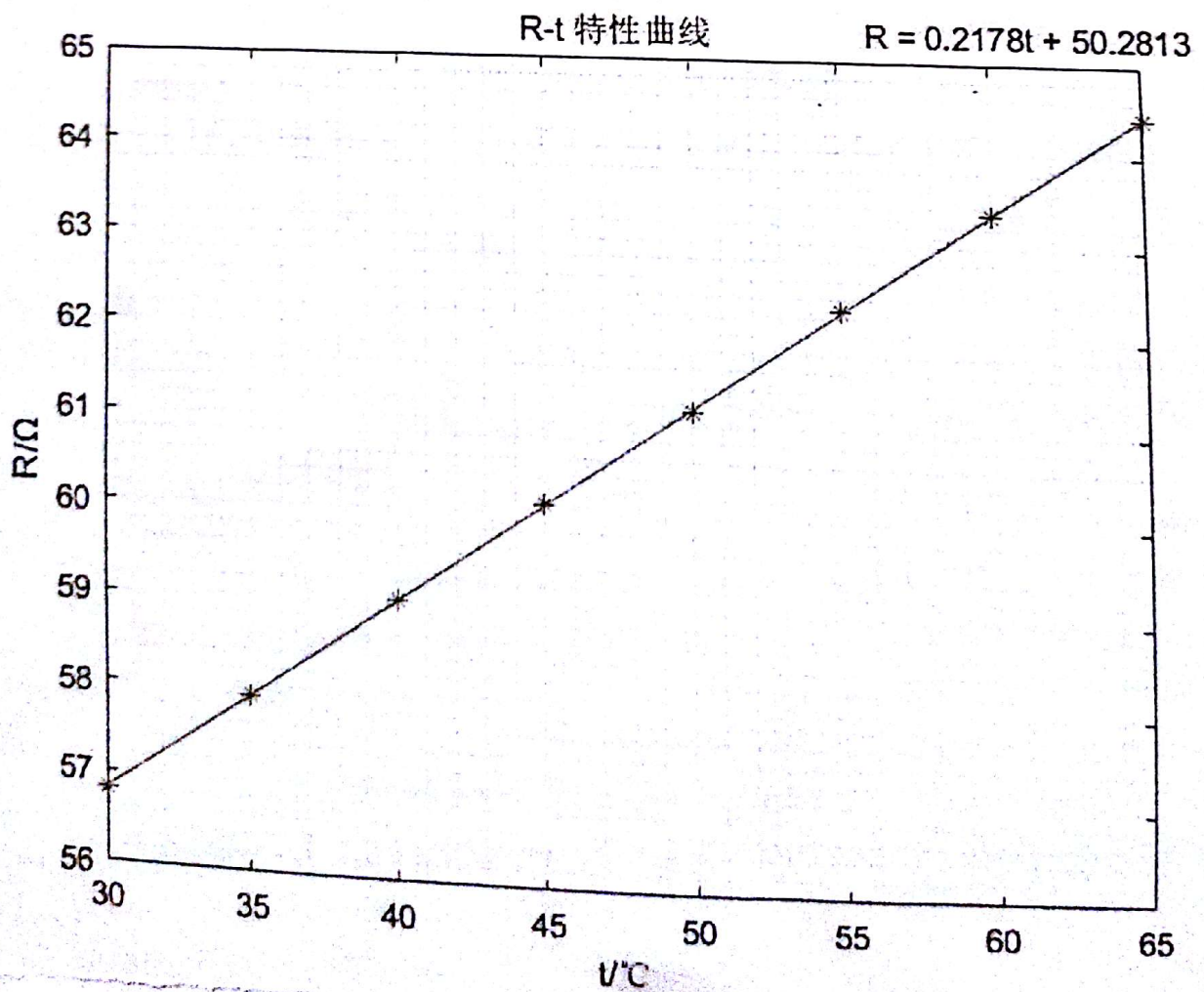
由④⑬式求出  $\alpha = \frac{0.2178}{50.2813} = 0.004331^\circ\text{C}^{-1}$

与理论值  $\alpha_0$  (⑩式) 相比， $E = \frac{|\alpha - \alpha_0|}{\alpha_0} = 0.012 = 1.2\%$  ⑭

附图 1



附图 2

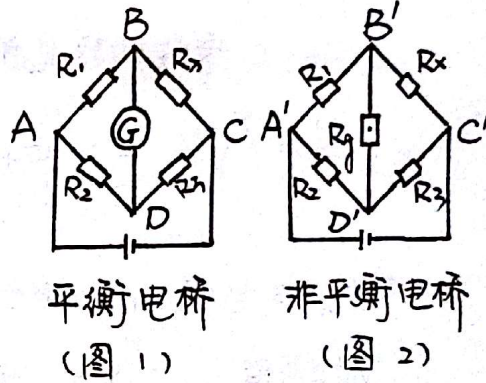


## 【误差分析】

1. 观察到在调整“铜电阻”与“ $R_x$ ”端相接处时，显示屏读数出现变动，因此此处若连接不良可能引入较大误差；
2. 由于加热、冷却铜电阻时，其温度变化较快，有可能存在电阻内部温度不同的情况，这会给实验引入误差。另外，由于到达某温度时，有的是升温达到，有的是降温达到，因此该误差无法由线性拟合消除；
3. 注意到在加热实验装置示数稳定的前提下，电压显示仍会有  $0.2\text{mV}$  左右的波动，这可能是由于加热实验装置精度有限。由于这个电压不可控，该误差也难以消除；
4. 在实验(2)中调节  $R_c$  时，出现连续几次调整示数均为“ $0.0\text{mV}$ ”或“ $-0.0\text{mV}$ ”的情况，我在实验中统一取变为“ $-0.0\text{mV}$ ”的前一次调整（示数为“ $0.0\text{mV}$ ”）的电阻值以减小这一误差影响。但由于与 3. 相同的原因，有时“ $0.0\text{mV}$ ”和“ $-0.0\text{mV}$ ”会波动出现，引入误差。

## 【实验心得及思考题】

思考题 1. 如右图 1, 2: 平衡电桥通过调节阻值使得检流计 G 示数为 0, 此时 B、D 连通, 因而等势。根据分压原理, 有  $R_1 R_3 = R_2 R_x$ , 由此  $R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$ 。



非平衡电桥不必在平衡状态下工作（在许多工程的实际状态中，平衡状态是难以达到的），其原理在 [实验原理] 部分已阐明。在操作中主要的不同是：平衡电桥通过调整  $R_1 \sim R_3$ （或只调整  $R_3$ ），使得只需读电阻值，但调节电阻较为复杂；非平衡电桥则读数、操作方便，但须读出 B、D 间电势差后计算得出  $R_x$ 。

思考题 2. 像本实验一样，非平衡电桥可以测出电阻值，因此可以与各种传感器（将力、温度、压强等等非电学量转化为电阻阻值这一电学量）结合，实现各种测量。例如：结合温度传感器（如本实验使用的  $\text{Cu}50$  电阻）测量电机内部温度；结合压力传感器测量产品的质量等等。

实验心得. 本次实验的操作较为简单，但搞清电桥的实现和作用思路花费了不少时间。本实验中耗时最长的部分是温度的调节：由于设备原因，在调节温度时不能心急，否则会花费更长的时间。

另外，非常感谢老师的提醒，使得我发现了在误差修约规则上的漏洞。误差有效位数以及修约的规则与不确定度一致。