

# 2020年秋季大学物理实验（2）-直流电桥的原理和应用

专业班级：电气1908 学号：U201912072 姓名：柯依娃 日期：2020/9/14 实验台：30号 报告柜：J21

## 实验名称:

直流电桥的原理和应用

## 实验目的:

- (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。

## 实验仪器材料

FQJ型非平衡直流电桥, 温度控制器, 升温加热炉.

## 直流电桥原理

### 电桥类型

单臂直流电桥是平衡电桥，又称惠斯通电桥

- (1) 等臂电桥：
- (2) 输出对称电桥（卧式电桥）：
- (3) 电源对称电桥（立式电桥）：

### 平衡电桥原理

$$R_X = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3 = K \cdot R_3$$

调节R3,当PA电流为0时,BD等电位,则有 $R_1/R_4 = R_2/R_3$

从而可求得R4

### 非平衡电桥原理

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

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

主要思路:当Rg趋近于无穷(开路),Ug不为0时的情况为不平衡电桥.先转为平衡电桥,再测得Ug,从而通过计算得到ΔRx

最开始,将U0转为0,作为预调平衡

$$|R_1 = R_4 = R, \quad R_2 = R_3 = R', \quad \text{且 } R \neq R';$$

再R4=R4+ΔR (x)

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

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

再根据具体情况进行代值处理

(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  $\Delta R$  项可略去,

此时各种电桥的输出电压公式为: ↵

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

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

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

(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: ↵

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

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

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

## 数据分析处理

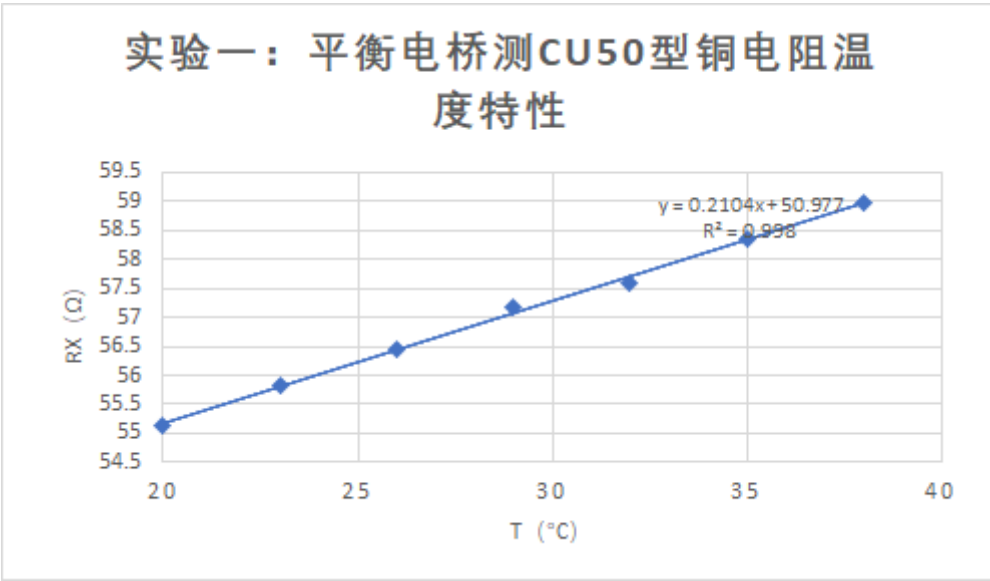
实验一:用平衡电桥测量Cu50型铜电阻的温度特性

平衡：R1=100 Ω , R2(Rb)=1000Ω,R3(Rc) =551.50Ω

其中 $R_x = \frac{R_1}{R_2} * R_3$

序号	1	2	3	4	5	6	7
$t\ (^{\circ}\text{C})$	20	23	26	29	32	35	38
$R_3\ (\Omega)$	551.50	558.40	564.50	571.70	577.60	583.40	589.90
$R_x\ (\Omega)$	55.15	55.84	56.45	57.17	57.60	58.34	58.99

画图进行数据拟合得到下图:



通过公式 $R = R_0(1 + \alpha t)$ 使用通过最小二乘法拟合成的直线数据

得到 $R_0 = 50.977\Omega, \alpha = 0.004127$

百分误差  $| (0.004127 - 0.004280) | / 0.004280 = 3.575$

实验二:用卧式电桥测量Cu50型铜电阻R(t)及电阻温度系数α

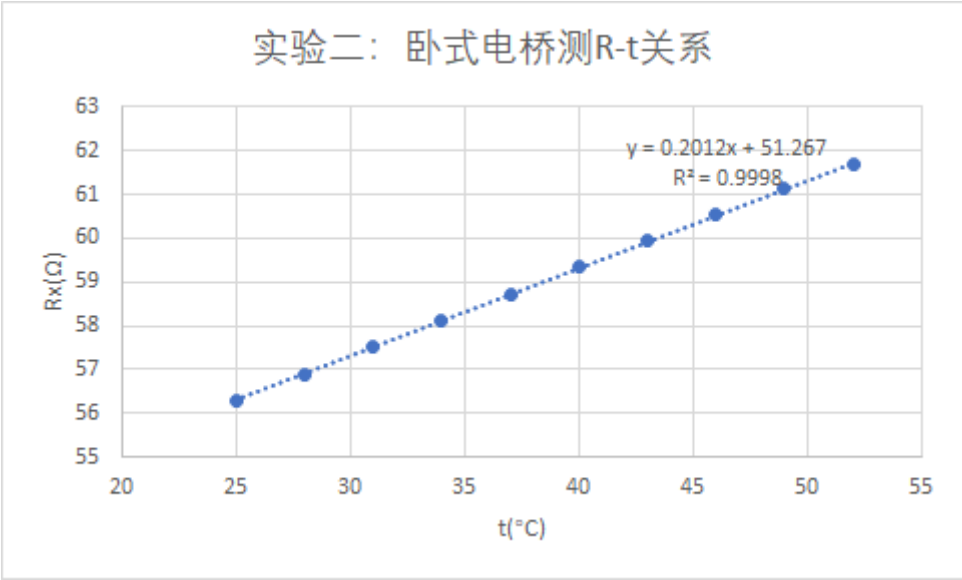
卧式：R2(Ra)=R3(Rb)=50Ω,R1(Rc) = 56.27Ω

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t\ (^{\circ}\text{C})$	25	28	31	34	37	40	43	46	49	52
$U_0(\text{mV})$	0	3.5	7.2	10.7	14.2	17.7	21.2	24.6	28.0	31.3
$R_x\ (\Omega)$	56.27	56.80846	57.37769	57.91615	58.45462	58.99308	59.53154	60.05462	60.57769	61.08538

此时电阻变化较小,则 $\Delta R << (R_1 + R_4)$  公式分母中的 $\Delta R$ 可以略去

通过 $U_0 = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R(x)}{R}$  计算得到 $R(x) = \frac{4R_1 U}{U_s} + R_1$

画出R(x)与温度的图形



代入公式  $R_t = R_0 (1 + \alpha t)$

计算可得到  $R_0 = 51.264\Omega, \alpha = 0.003924$

经验方程  $R_t = 51.264 + 0.2012t$

实验三:用立式电桥测量MF51型热敏电阻的温度特性

立式：R1(Ra)=R2(Rb)=100Ω,R3 (Rc) =2551.00Ω

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t (°C)	25	28	31	34	37	40	43	46	49	52	55	58
U0(mV)	0	-4.9	-10.7	-17.1	-24.1	-31.7	-39.8	-48.5	-57.9	-68	-78.5	-90
Rx (Ω)	2551	2310.17	2076.17	1865.58	1677.46	1510.14	1363.34	1232.81	1115.66	1010.75	919.303	834.996
T (k)	298.15	301.15	304.15	307.15	310.15	313.15	316.15	319.15	322.15	325.15	328.15	331.15
1/T	0.003354016	0.00332	0.00329	0.00326	0.00322	0.00319	0.00316	0.00313	0.0031	0.00308	0.00305	0.00302
lnRx	7.844240718	7.74508	7.63828	7.53133	7.42504	7.31996	7.21769	7.11705	7.0172	6.91845	6.82362	6.72743

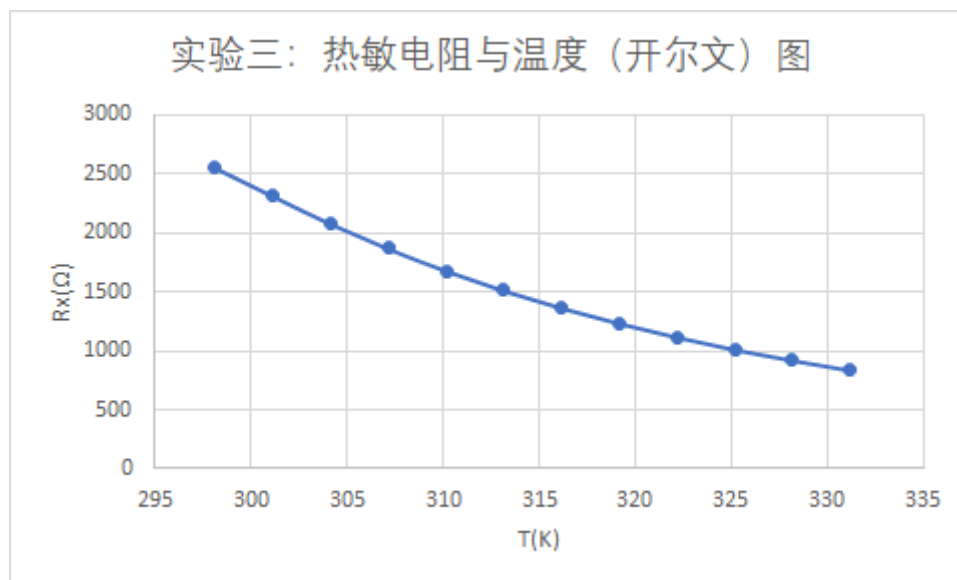
通过 
$$U_0 = \frac{R'}{(R + R')^2} \cdot \frac{\Delta R(x)}{1 + \frac{\Delta R(x)}{R + R'}} \cdot U_s$$

变换求得  $R_x == \frac{U_0}{\frac{130000}{2651^2} - \frac{U_0}{2651}} + 2551\Omega$

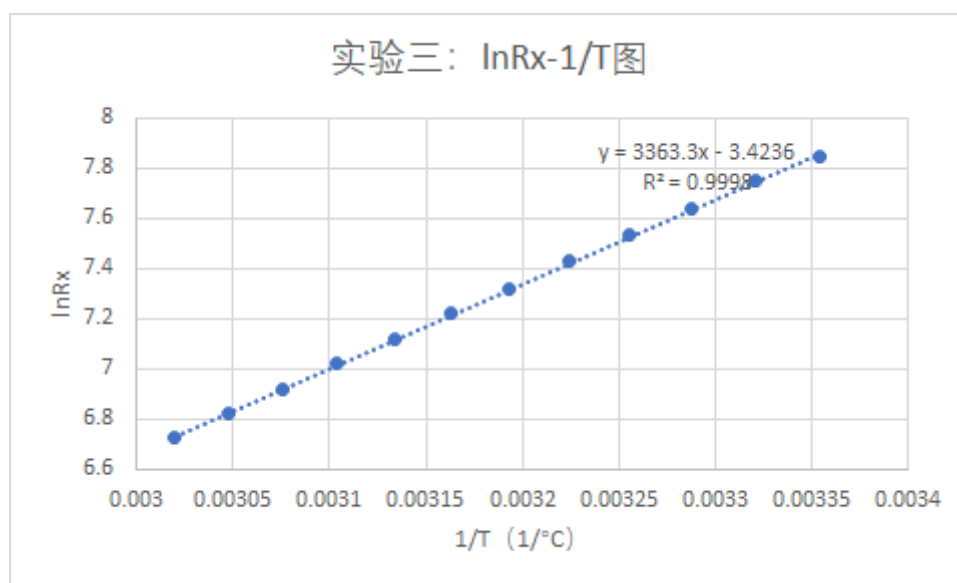
再通过T(k)=t+273.15

列出上表

通过此表画出Rx-T图



$\ln R(T) \sim 1/T$ 图



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

得  $\ln R_t = B_n * \frac{1}{T} + \ln R_{25} - B_n * \frac{1}{298.15}$

从而得到  $B_n = 3363.3$ ,  $R_{25} = 2583.66\Omega$

经验方程  $R_t = 2583.66e^{3363.3(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15})}$

## 结果分析

**比较用平衡电桥和非平衡电桥测得的铜电阻哪个更准确，并分析原因。**

与实际情况比较发现平衡电桥的测量更为准确

- 平衡电桥电阻调节精度更高，可达0.1%，而非平衡电阻记录的U的精度很低，同时电阻调节可以调成刚好在-0.0到+0.0之间会更合适
- 当把非线性问题线性化,用近似线性关系来处理实验数据时,将会给测量带来非线性误差。

## 查阅文献资料

### • 直流电桥误差

常用的 QJ23 直流电桥电路如图 3 所示, 其中  $R_1 R_2$  称为比率臂, 用来调节式 (4) 的比率系数  $R_1 / R_2$ , 实际是一个按十倍率抽头的分压器。  $R_0$  称为比较臂, 是一个四位十进电阻箱。因此, 在考虑桥臂电阻产生的误差时, 除考虑  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_0$  各臂电阻不稳定、不准确引起的相对误差  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_0$  外, 还要考虑  $R_0$  的电刷接触处过渡电阻引起的变差  $\pm \Delta R_0$ 。有

$$\delta_1 = \frac{R'_1 - R_1}{R'_1} \quad (9)$$

$$\delta_2 = \frac{R'_2 - R_2}{R'_2} \quad (10)$$

$$\delta_0 = \frac{R'_0 - R_0}{R'_0} \pm \frac{\Delta R_0}{R_0} \quad (11)$$

式中  $R'_1$ 、 $R'_2$ 、 $R'_0$  为额定值;  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_0$  为实际值。相对测量误差  $\delta_x$  定义为电桥指示值  $R'_x$  与被测电阻实际值  $R_x$

之差被  $R'_x$  除, 即

$$\delta_x = \frac{R'_x - R_x}{R'_x} \quad (12)$$

经过计算, 得

$$\delta_x = \delta_1 - \delta_2 + \delta_0 \pm \frac{\Delta R_0}{R_0} \quad (13)$$

如果已给出各臂电阻的误差, 则可由 (13) 式计算测量结果的校正值。但如果只给出电桥各臂电阻的容许误差, 则只能按

极限误差公式求出测量结果的极限误差

$$\delta_x = \pm \left[ \delta_1 + \delta_2 + \delta_0 + \frac{\Delta R_0}{R_0} \right] \quad (14)$$

常用的电桥有: 便携式的 QJ23 (0.2 级, 量限  $1\text{--}9999000 \Omega$ , 基本量限  $10^2\text{--}99990 \Omega$ ), QJ24 (0.1 级, 量限  $10^3\text{--}9999000 \Omega$ , 基本量限  $20\text{--}99990 \Omega$ ); 实验室型的 QJ37 (0.01 级, 量限  $1\text{--}10^7 \Omega$ , 基本量限  $10^2\text{--}10^6 \Omega$ ), QJ30 (0.005 级, 量限  $1\text{--}10^8 \Omega$ , 基本量限  $10^2\text{--}10^6 \Omega$ ) 等。

### 非平衡电桥

若定义非线性误差  $D = \frac{|U_0 - U|}{U_0}$  [3], 则对

等式电桥, 由 (3) 和 (6) 式有

$$D = \frac{\left| \frac{\delta U_s}{2(2 + \delta)} - \frac{U_s \delta}{4} \right|}{\frac{\delta U_s}{2(2 + \delta)}} = \frac{1}{2} \delta. \quad (8)$$

在非平衡电桥的各个参数（桥臂电阻  $R_1 \sim R_4$ ，电源电压  $U_s$ 、电压表量程  $U_m$ ）确定后，其测量范围就不是一定值，若测量对象不在这个范围内，则电压表就会发生溢出现象。由（3）式可得等式电桥的测量范围

$$\delta_m = \frac{4U_m}{U_s - 2U_m}, \quad (10)$$

### 2.3 灵敏度

电桥的灵敏度和测量误差相关，灵敏度越高，其测量误差越小。若定义电桥的灵敏度  $S = \frac{dU^{[3]}}{d\delta}$ ，

则对等式电桥，由（3）式有

$$S = \frac{dU}{d\delta} = \frac{(\delta_s)' [2(2+\delta)] - (\delta_s) [2(2+\delta)]'}{[2(2+\delta)]^2} = \frac{U_s}{(2+\delta)^2}. \quad (12)$$

从而可以判断认为平衡电桥更准确，因为非平衡电桥有非线性误差，且灵敏度较低