

实验题目：非平衡电桥

实验者姓名：吴欣怡 学号：PB21051111 实验日期和时间：2022.12.15 组内序号：4

关键词：非平衡电桥、桥式电路、不平衡电压、电阻变化、并联、串联

摘要：本实验中，我们使用分立电阻箱自组了一台非平衡电桥。

第 1 步，测量和分析了三种不同桥臂电阻值情况下，非平衡的输出电压 U_g 与桥臂电阻改变量 (ΔR 或 $\Delta R/R_0$) 之间变化关系，推算了线性关系成立条件下的桥臂电阻改变量区域及大小，还计算三种不同桥臂电阻情况下的电桥零点绝对灵敏度。由此得出结论，桥臂电阻越小，线性输出时桥臂电阻改变量越窄，但绝对灵敏度反而提高。

第 2 步，在了解上述特性的基础上，我们选择 50Ω 较小的桥臂电阻值，使用已有的非平衡电桥来测量 3 米长的铜丝在不同温度下的电阻值，线性变化关系良好。由此数据推算 0°C 和 20°C 处的电阻温度系数的数值分别为 $0.0042380(^{\circ}\text{C}^{-1})$ 、 $0.0039064(^{\circ}\text{C}^{-1})$ ，以及它们各自（相对）的不确定度 1.16% 和 1.07%。

引言：非平衡电桥的基本原理是通过桥式电路来测量电阻，根据电桥输出的不平衡电压，再进行简单的线性运算处理，从而得到电阻的变化量，以及引起电阻变化的其它物理量，如温度、压力、形变等。

实验目的：1. 了解非平衡电桥的组成和工作原理，以及在实际中的应用。

2. 学会用外接电阻箱法研究非平衡电桥的桥路输出电压与电阻改变量之间的关系，通过作图法研究其线性规律。

3. 研究桥臂电阻大小对非平衡电桥输出灵敏度和线性范围的影响，根据不同的测量需求，来选择合适的桥臂电阻。

4. 利用非平衡电桥测量铜丝（或其他金属丝）的电阻温度系数。

实验原理：直流非平衡电桥原理如图 1 所示，当 $\frac{R_3}{R_2} = \frac{R_4}{R_1}$ ，电桥平衡，有 $U_g = 0$ 。当用 $R_4 + \Delta R$ 代替 R_4 时，

$\frac{R_3}{R_2}$ 不等于 $\frac{R_4 + \Delta R}{R_1}$ ，此时 U_g 不等于 0，为非平衡状态。

U_g 为高精电压表值，测量 C、D 二点输出电压（电压表内阻看着无穷大），应用电路分析知识，

可算出输出的非平衡电压为：
$$U_g = \frac{R_2 R_4 + R_2 \Delta R - R_1 R_3}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3) + \Delta R(R_2 + R_3)} U_s \quad (1)$$

分析上式，可以得到电桥的三种形式：

(1) 等臂电桥： $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \equiv R_0$

(2) 卧式电桥： $R_1 = R_4$ ， $R_2 = R_3$

(3) 立式电桥： $R_1 = R_2$ ， $R_3 = R_4$

将等臂条件代 $\delta = \frac{\Delta R}{R_0}$ 入 (1) 式经简化得：
$$U_g = \frac{U_s}{4} \delta \frac{1}{1 + \frac{1}{2}\delta} \quad (2)$$

其中称为电阻的应变变量，或叫“相对改变量”。我们在设计电桥时，令 $\Delta R \ll R_0$ ，则 $\delta \rightarrow 0$ ，

于是有：
$$U_g = \frac{U_s}{4} \delta = \frac{U_s}{4R_0} \Delta R \quad (3)$$

这样，非平衡电桥输出电压 U_g 与桥臂电阻的变化量 ΔR 成正比，为线性关系。当 ΔR 较大时，

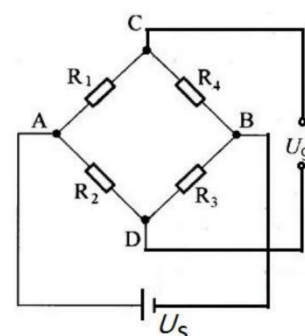


图 1 非平衡电桥电路图

式中的 $\frac{\delta}{2}$ 项不能省略, 此时 $U_g = \frac{U_s}{4} \delta \frac{1}{1+\frac{\delta}{2}}$, U_g 与 δ 呈非线性关系。

实验: 实验仪器: 直流稳压电源、电阻箱、万用表 (用作伏特表)、Keithy2000 (用作微伏表)、铜丝 (漆包线)、加热台、温度计、导线等。

实验内容及原理:

实验 1: 用外接电阻箱法研究非平衡电桥的 U_g 与 δ 关系, 作出 $U_g - \delta$ 曲线, 并对此实验曲线与理想直线之间进行误差分析, 以确定电桥输出的线性范围和灵敏度。

(1) 调节电源输出电压, 同时用万用表直流电压档来校准, 使其输出电压为 $U_s = 2.0V$ 。电路如图 1

所示并用导线连接好, 用高精度台式万用表 (Keithy2000) 来测量 U_g 。

(2) 先取电桥为等臂, 即: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \equiv R_0 = 1k\Omega$, 由于导线存在一定的电阻, 微调改变 R_3 的值, 使 U_g 为零, 此时电桥平衡。(记录 R_3 的具体值)

(3) 改变 R_4 从 800 至 1200 Ω , 每次变化量为 20 Ω , 按顺序记下各 U_g 的值, 作出 $U_g - \delta$ 散点图。

(4) 根据公式 (3) 过原点作一条直线 (斜线) $U_g^{\text{理线}} - \delta$, 并与实际测量的 $U_g^{\text{实线}} - \delta$ 曲线进行比较, 得出 $U_g - \delta$ 的线性关系成立的 δ 取值范围。

(5) 测算在此桥臂电阻值下, 电桥在零点附近的绝对灵敏度。

(6) 保持电源电压 $U_s = 2.0V$ 不变, 改变 R_0 的值, 研究非平衡电桥的线性范围和灵敏度与 R_0 的关系。

实验 2: 利用搭建的直流非平衡电桥, 测量并记录铜丝 (Cu) 的电阻, 以及其电阻随温度的改变值。分别计算铜丝的在 0 $^{\circ}\text{C}$ 和 20 $^{\circ}\text{C}$ 时的电阻温度系数的值和不确定度。

(1) 取桥臂电阻为 50 Ω , 用 Keithy2000 来测量桥路输出电压 U_g 。保持恒压源输出电压为 2.0V, 微调 R_3 使电桥平衡。平衡后, 记录对应的 $U_{g0\min}$ 。

(2) 把 3m 长, 直径为 0.60mm 的 Cu 丝 (漆包线) 串联到 R_4 所在的桥臂上。把 Cu 丝浸没在陶瓷杯内的水中, 用温度计测量水温 t , 记录水温并测量当前水温下桥路输出电压 $U_g(t)$ 值, 计算 Cu 丝的当前温度下的电阻值 $R_{Cu}(t)$ 。

(3) 用加热台对杯子里水进行加热, 铜丝温度缓慢上升。每隔 5 $^{\circ}\text{C}$ 记录一下对应的 $U_g(t)$ 值, 直到温度达到 85 $^{\circ}\text{C}$ 为止。

实验结果讨论:

实验数据: 对 ΔR 、 δ 进行计算加入数据表。由于实验时万用表输入输出接口插反, 导致所有数据正负号反号, 处理后实验数据表如下:

实验 1: 用外接电阻箱法研究非平衡电桥的 U_g 与 δ 关系, 作出 $U_g - \delta$ 曲线, 并对此实验曲线与理想直线之间进行误差分析, 以确定电桥输出的线性范围和灵敏度。 $U_s = 2.0V$

表 1: $R_0 = 1000\Omega$ 时, 桥路二端点 C、D 输出电压与桥臂电阻改变量 δ 的关系 ($R_3 = 999.89\Omega$)

$R_4(\Omega)$	800	820	840	860	880	900	920	940	960	980	1000
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	-200	-180	-160	-140	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0
$\delta = \Delta R/R_0$	-0.2	-0.18	-0.16	-0.14	-0.12	-0.1	-0.08	-0.06	-0.04	-0.02	0
$U_g(mV)$	-110.92	-98.76	-86.84	-75.17	-63.75	-52.56	-41.6	-30.88	-20.36	-10.07	0
$R_4(\Omega)$	1020	1040	1060	1080	1100	1120	1140	1160	1180	1200	
$\delta = \Delta R/R_0$	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
$U_g(mV)$	9.9	19.6	29.13	38.46	47.61	56.6	65.42	74.08	82.57	90.91	

表 2: $R_0 = 5000\Omega$ 时, 桥路二端点 C、D 输出电压与桥臂电阻改变量 δ 的关系 ($R_3 = 4999.16\Omega$)

$R_4(\Omega)$	4000	4100	4200	4300	4400	4500	4600	4700	4800	4900	5000
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	-1000	-900	-800	-700	-600	-500	-400	-300	-200	-100	0
$\delta = \Delta R/R_0$	-0.20	-0.18	-0.16	-0.14	-0.12	-0.10	-0.08	-0.06	-0.04	-0.02	0
$U_g(mV)$	-111.16	-98.95	-87.00	-75.31	-63.86	-52.66	-41.69	-30.94	-20.41	-10.10	0.00
$R_4(\Omega)$	5100	5200	5300	5400	5500	5600	5700	5800	5900	6000	
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
$\delta = \Delta R/R_0$	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	
$U_g(mV)$	9.91	19.62	29.14	38.48	47.64	56.63	65.46	74.11	82.62	90.94	

表 3: $R_0 = 50\Omega$ 时, 桥路二端点 C、D 输出电压与桥臂电阻改变量 δ 的关系 ($R_3 = 49.92\Omega$)

$R_4(\Omega)$	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
$\delta = \Delta R/R_0$	-0.20	-0.18	-0.16	-0.14	-0.12	-0.10	-0.08	-0.06	-0.04	-0.02	0
$U_g(mV)$	-111.67	-98.51	-86.61	-74.96	-63.56	-52.41	-41.48	-30.78	-20.30	-10.03	0.01
$R_4(\Omega)$	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$\delta = \Delta R/R_0$	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	
$U_g(mV)$	9.86	19.54	29.03	38.33	47.46	56.42	65.21	73.83	82.30	90.58	

实验 2: 利用搭建的直流非平衡电桥, 测量并记录铜丝 (Cu) 的电阻, 以及其电阻随温度的改变值。计算铜丝的电阻温度系数, 在 0℃和 20℃时的值和不确定度。

表 4: $R_0 = 50\Omega$ 时, 桥路二端点 C、D 输出电压与铜丝温度改变量的关系 ($R_3 = 50.02\Omega$ $U_g = 0.01mV$)

T/℃	20	25	30	35	40	45	50
$U_g(mV)$	2.06	2.10	2.13	2.18	2.22	2.26	2.30

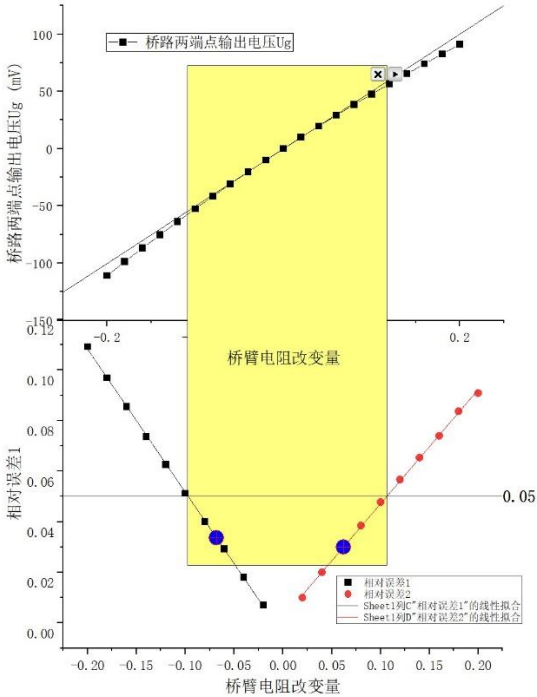
T/℃	55	60	65	70	75	80	85
$U_g(mV)$	2.34	2.38	2.42	2.46	2.50	2.54	2.58

数据处理与误差分析: $U_g(mV)$

实验 1: 当 $R_0 = 1000\Omega$ 时, 利用 Origin 作出 $U_g - \delta$ 散点图与 $U_g^{\text{理论}} - \delta$ 直线, 并分析相对误差如下右图:

图 1: 当 $R_0 = 1000\Omega$ 时, 电桥输出电压 与电阻相对改变量 之间的线性关系区域分析
(直线为 U_g 的理论值)

$\delta=R/R_0$	U_g 实测	U_g 线性	U_g 实测 - U_g 线性	相对误差
-0.2	-110.92	-100	10.92	0.1092
-0.18	-98.72	-90	8.72	0.0969
-0.16	-86.84	-80	6.84	0.0855
-0.14	-75.17	-70	5.17	0.0736
-0.12	-63.75	-60	3.75	0.0625
-0.1	-52.56	-50	2.56	0.0512
-0.08	-41.6	-40	1.60	0.0400
-0.06	-30.88	-30	0.88	0.0293
-0.04	-20.36	-20	0.36	0.0180
-0.02	-10.07	-10	0.07	0.0070
0	0	0	0	
0.02	9.90	10	-0.10	-0.0100
0.04	19.60	20	-0.40	-0.0200
0.06	29.13	30	-0.87	-0.0290
0.08	38.46	40	-1.54	-0.0385
0.1	47.61	50	-2.39	-0.0478
0.12	56.60	60	-3.40	-0.0567
0.14	65.42	70	-4.58	-0.0654
0.16	74.08	80	-5.92	-0.0740
0.18	82.57	90	-7.43	-0.0837
0.2	90.91	100	-9.09	-0.0909



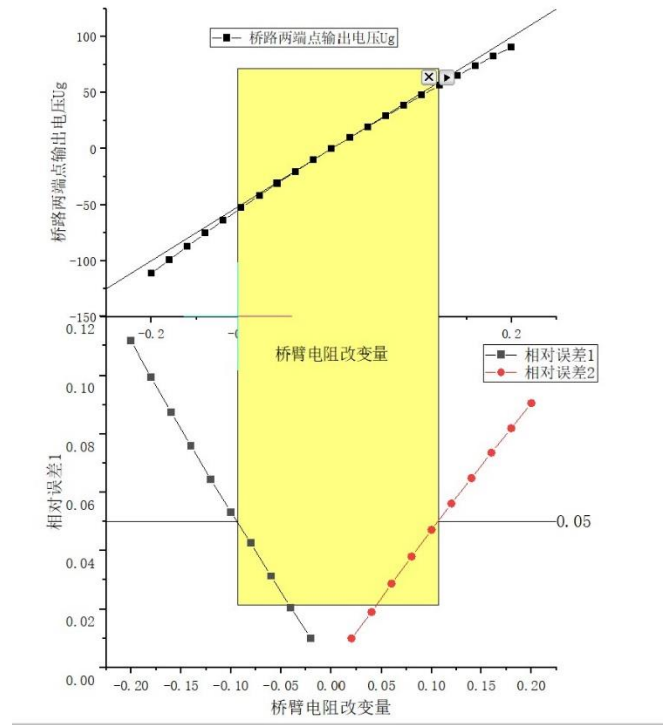
线性区域范围： $-0.09725 < \delta = \frac{\Delta R_4}{R_0} < 0.11045$, $-97.25 < \Delta R_4 < 110.45$, 取整得到 $963 < R_4 < 1110$;

电桥在零点附近的绝对灵敏度： $S_{U_a} = \frac{9.90 - (-10.07)}{1020 - 980} = 0.49925$

当 $R_0 = 5000\Omega$ 时, 利用 Origin 作出 $U_g - \delta$ 散点图与 $U_g^{理线} - \delta$ 直线, 并分析相对误差如下右图:

图 2: 当 $R_0 = 5000\Omega$ 时, 电桥输出电压 与电阻相对改变量之间的线性关系区域分析
(直线为 U_g 的理论值)

$\delta=R/R_0$	$U_{\text{实测}}$	$U_{\text{线性}}$	$U_{\text{实测}}-U_{\text{线性}}$	相对误差
-0.2	-111.16	-100	11.16	0.1116
-0.18	-98.95	-90	8.95	0.0994
-0.16	-87.00	-80	7.00	0.0875
-0.14	-75.31	-70	5.31	0.0759
-0.12	-63.86	-60	3.86	0.0643
-0.1	-52.66	-50	2.66	0.0532
-0.08	-41.69	-40	1.69	0.0426
-0.06	-30.94	-30	0.94	0.0313
-0.04	-20.41	-20	0.41	0.0205
-0.02	-10.10	-10	0.10	0.0100
0	0	0	0	
0.02	9.90	10	0.10	0.0100
0.04	19.62	20	0.38	0.0190
0.06	29.14	30	0.86	0.0287
0.08	38.48	40	1.52	0.0380
0.1	47.64	50	2.36	0.0472
0.12	56.63	60	3.37	0.0562
0.14	65.46	70	4.54	0.0649
0.16	74.11	80	5.89	0.0736
0.18	82.62	90	7.38	0.0820
0.2	90.94	100	9.06	0.0906



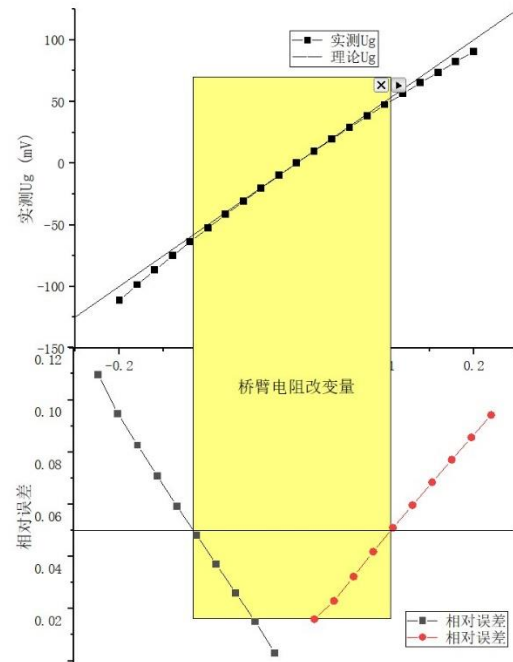
线性区域范围： $-0.10388 < \delta = \frac{\Delta R_4}{R_0} < 0.11959$ ， $-519.4 < \Delta R_4 < 597.95$ ，取整得到 $4480 < R_4 < 5598$ ；

电桥在零点附近的绝对灵敏度： $S_{U_a} = \frac{9.90 - (-10.10)}{5100 - 4900} = 0.1000$

当 $R_0 = 50\Omega$ 时，利用 Origin 作出 $U_g - \delta$ 散点图与 $U_g^{\text{理论}} - \delta$ 直线，并分析相对误差如下右图：

图 3：当 $R_0 = 50\Omega$ 时，电桥输出电压与电阻相对改变量之间的线性关系区域分析

$\delta=R/R_0$	$U_{\text{实测}}$	$U_{\text{线性}}$	$U_{\text{实测}}-U_{\text{线性}}$	相对误差
-0.2	-110.97	-100	10.97	0.1097
-0.18	-98.51	-90	8.51	0.0946
-0.16	-86.61	-80	6.61	0.0826
-0.14	-74.96	-70	4.96	0.0709
-0.12	-63.56	-60	3.56	0.0593
-0.1	-52.41	-50	2.41	0.0482
-0.08	-41.48	-40	1.48	0.0370
-0.06	-30.78	-30	0.78	0.0260
-0.04	-20.30	-20	0.30	0.0150
-0.02	-10.03	-10	0.03	0.0030
0	0.01	0	0.01	
0.02	9.86	10	0.16	0.0160
0.04	19.54	20	0.46	0.0230
0.06	29.03	30	0.97	0.0323
0.08	38.33	40	1.67	0.0418
0.1	47.46	50	2.54	0.0510
0.12	56.42	60	3.58	0.0597
0.14	65.21	70	4.79	0.0684
0.16	73.83	80	6.17	0.0771
0.18	82.30	90	7.70	0.0856
0.2	90.58	100	9.42	0.0942



线性区域范围： $-0.10426 < \delta = \frac{\Delta R}{R_0} < 0.09698$ ， $-5.213 < \Delta R < 4.849$ ，取整得到 $45 < R_4 < 55$ ；

电桥在零点附近的绝对灵敏度： $S_{U_a} = \frac{\Delta U_g}{\Delta R} = \frac{9.86 - (-10.03)}{51 - 49} = 9.945$

综上所述，整理得到：

表 2：不同大小桥臂电阻情况下的电桥特性

桥臂电阻 (Ω)	R_0	5000	1000	50
线性范围 (Ω)	$2\Delta R = R_{4R} - R_{4L}$	1118	147	10
灵敏度 (mV/Ω)	S_{Uabs}	0.100	0.49925	9.945

总结：

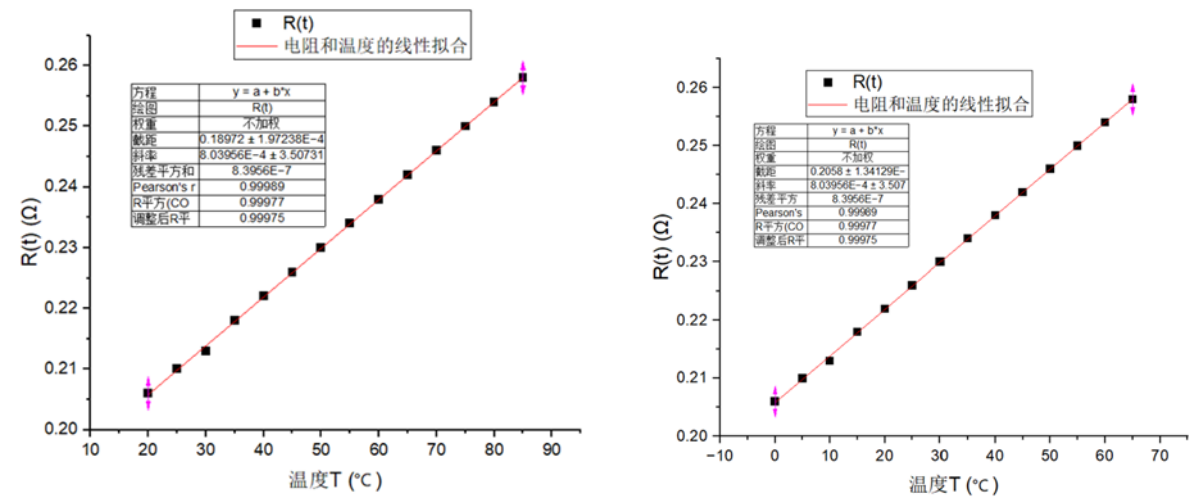
桥臂电阻越小，线性输出时桥臂电阻改变量越窄，但绝对灵敏度反而提高

实验二：利用搭建的直流非平衡电桥，测量并记录铜丝（Cu）的电阻，以及其电阻随温度的改变值。计算铜丝的电阻温度系数，在 0℃ 和 20℃ 时的值和不确定度。

根据各个不同温度点下的 $U_g(t)$ ，利用线性关系 $U_g = \frac{U_s}{4} \delta = \frac{U_s}{4R_0} \Delta R$ ，计算出铜丝在各个温度点下的电阻 $R_{Cu}(t)$ ：

$T(^{\circ}\text{C})$	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
$U_g(t)(\text{mV})$	2.06	2.10	2.13	2.18	2.22	2.26	2.30	2.34	2.38	2.42	2.46	2.50	2.54	2.58
$R_{Cu}(t)(\Omega)$	0.206	0.210	0.213	0.218	0.222	0.226	0.23	0.234	0.238	0.242	0.246	0.25	0.254	0.258

利用 Origin 作出 $R_{Cu}(t) \sim t$ 的散点图以及拟合直线（以下分别为 0℃ 起始和 20℃ 起始的图像）



拟合直线的斜率 $k = \frac{dR}{dt} = 8.03956 \times 10^{-4} (\Omega/^{\circ}\text{C})$ 拟合直线: $R(t) = 0.1897 + 8.0396 \times 10^{-4} (\Omega)$

由拟合直线推算得到 0℃ 时铜丝电阻拟合值 $\widehat{R}_0 = 0.1897 \Omega$ ，20℃ 时的铜丝电阻拟合值 $\widehat{R}_{20} = 0.2058 \Omega$ 。

又根据电阻温度系数定义式 $\alpha_T = k/R_T$ ，计算得到 Cu 丝的在 0℃ 处的电阻温度系数 $\alpha_0 = 4.2380 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C}^{-1})$ 和 20℃ 处的电阻温度系数 $\alpha_{20} = 3.9064 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C}^{-1})$ 。

不确定度分析：

由 Origin 得到：

参数		值	标准误差	t值	概率> t	置信区间半宽
R(t)	截距	0.18972	1.97238E-4	961.88955	1.07366E-30	4.29744E-4
	斜率	8.03956E-4	3.50731E-6	229.22271	3.19709E-23	7.64178E-6
	X轴截距	-235.98414	1.2616	-187.05146	3.66468E-22	2.74879

相关		
R(t)		
	Intercept	Slope
Intercept	1	-0.93356
Slope	-0.93356	1

对 0°C 处的电阻在 $P = 95\%$ 置信概率下的不确定度 u_{α_0}

$$\frac{u_{\alpha_0}}{\alpha_0} = \sqrt{\left(\frac{u_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{u_m}{m}\right)^2 - 2\rho_{b,m}\left(\frac{u_b}{b}\right)\left(\frac{u_m}{m}\right)}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{4.29744 \times 10^{-4}}{0.18972}\right)^2 + \left(\frac{7.64178 \times 10^{-6}}{8.03956 \times 10^{-4}}\right)^2 - 2 \times (-0.93356) \times \left(\frac{4.29744 \times 10^{-4}}{0.18972}\right) \times \left(\frac{7.64178 \times 10^{-6}}{8.03956 \times 10^{-4}}\right)}$$

$$= 0.0116$$

$$u_{\alpha_0} = \frac{u_{\alpha_0}}{\alpha_0} \times \alpha_0 = 0.0116 \times 4.2380 \times 10^{-3} = 4.9161 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C}^{-1}) \quad u_{\alpha_0} = (4.2380 \pm 0.0492) \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C}^{-1})$$

由 Origin 得到:

参数						
		值	标准误差	t 值	概率> t	置信区间半宽
R(t)	截距	0.2058	1.34129E-4	1534.34414	3.95652E-33	2.92242E-4
	斜率	8.03956E-4	3.50731E-6	229.22271	3.19709E-23	7.64178E-6
	X 轴截距	-255.98414	1.2616	-202.90435	1.38101E-22	2.74879

创建显著不同于零(参阅方差分析表)

相关		
R(t)		
	Intercept	Slope
Intercept	1	-0.84984
Slope	-0.84984	1

对 20°C 处的电阻在 $P = 95\%$ 置信概率下的不确定度 $u_{\alpha_{20}}$

$$\frac{u_{\alpha_{20}}}{\alpha_{20}} = \sqrt{\left(\frac{u_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{u_m}{m}\right)^2 - 2\rho_{b,m}\left(\frac{u_b}{b}\right)\left(\frac{u_m}{m}\right)}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{2.92242 \times 10^{-4}}{0.2058}\right)^2 + \left(\frac{7.64178 \times 10^{-6}}{8.03956 \times 10^{-4}}\right)^2 - 2 \times (-0.84984) \times \left(\frac{2.92242 \times 10^{-4}}{0.2058}\right) \times \left(\frac{7.64178 \times 10^{-6}}{8.03956 \times 10^{-4}}\right)}$$

$$= 0.0107$$

$$u_{\alpha_{20}} = \frac{u_{\alpha_{20}}}{\alpha_{20}} \times \alpha_{20} = 0.0107 \times 3.9064 \times 10^{-3} = 4.1800 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C}^{-1}) \quad u_{\alpha_0} = (3.9064 \pm 0.0107) \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C}^{-1})$$

实验讨论: 本实验用非平衡电桥测量出了铜丝电阻值 $R_0 = 0.18972\Omega$, 与电阻定律公式计算得到的有

$R_0 = \rho \frac{l}{S} = 0.179\Omega$ 有一定差距, 推测误差存在于外界温度不同、温度与电压对应读数不准确等原因。

思考题:

1. 简述直流非平衡电桥与直流平衡电桥的关系。

直流电桥是一种精密的电阻测量仪器, 按电桥的测量方式可分为平衡电桥和非平衡电桥。两者都表示电桥中某两个特定的接点的电势情况, 相等时为平衡电桥, 不相等时为不(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。平衡电桥是利用其平衡状态分析和计算电桥线路, 只能用于测量具有相对稳定状态的物理量, 操作繁琐、测量时间长; 非平衡电桥

是通过桥式电路来测量电阻，根据电桥输出的不平衡电压，再进行简单的线性运算处理，从而得到电阻的变化量，以及引起电阻变化的其它物理量，能用于测量连续变化的物理量，操作简便、测量时间短、易实现数字化测量

2. 为什么在实验内容 1 中， ΔR_4 的绝对值相同时， R_4 小于 1000Ω 时的 U_g 值比 R_4 大于 1000Ω 时的 U_g 值，绝对值大？

由于实际公式 $U_g = \frac{U_s}{4} \delta \frac{1}{1+\frac{1}{2}\delta}$ 中， $\delta = \frac{\Delta R}{R_0}$ 的绝对值相同时，当 $\delta < 0$ ， $\frac{1}{1+\frac{1}{2}\delta} > 1$ ；当 $\delta > 0$ ， $\frac{1}{1+\frac{1}{2}\delta} < 1$ 。当 R_4 小于 1000Ω 时 $U_g = \frac{U_s}{4} \delta \frac{1}{1+\frac{1}{2}\delta} > U_g = \frac{U_s}{4} \delta$ ； R_4 大于 1000Ω 时 $U_g = \frac{U_s}{4} \delta \frac{1}{1+\frac{1}{2}\delta} < U_g = \frac{U_s}{4} \delta$ 。

所以当 ΔR_4 的绝对值相同时， R_4 小于 1000Ω 时的 U_g 值比 R_4 大于 1000Ω 时的 U_g 值绝对值大。

3. 假设用非平衡电桥来测量一个热敏电阻的电阻值随温度的变化， $U_s = 2.0V$ ，毫伏表最小刻度为 $1mV$ ，在室温（ $35^\circ C$ ）到 $85^\circ C$ 度范围内，热敏电阻的电阻值改变 50Ω 。取等臂电桥，为了保证测量的灵敏度（即：每隔 $5^\circ C$ 读一次输出电压值，变化量不小于 $1mV$ ）并且保持（与理论线性之间的）误差小于 5% 的线性范围，请问 R_0 取多少比较合适？（指取值范围的上、下限）

为了保证测量的灵敏度，使 $U_g = \frac{U_s}{4} \delta > 1mV$ ，则 $R \leq 2500\Omega$ ；为了保持（与理论线性之间的）误差小于 5% 的线性范围，使 $-\frac{10}{105} \leq \frac{\Delta R}{R} \leq \frac{10}{95}$ ，则 $R \geq 475\Omega$ ，所以 $475\Omega \leq R \leq 2500\Omega$ 。

4. 把计算出来的 Cu 丝电阻温度系数（ $t = 20^\circ C$ ）与参考值 $0.00393(^\circ C)^{-1}$ 进行比较，并分析测量的精确程度，以及产生误差的可能原因。

$$\left| \frac{0.0039064 - 0.00393}{0.00393} \right| = 0.601\%$$

测量结果与参考结果的误差为 0.601%，可认为本次测量较为准确，但仍存在误差，

分析来源可能源于：

1. 加热时铜丝升温较快，温度与电压对应读数不准确；
2. 铜丝本身电阻温度系数由于氧化等原因与参考结果不同。
3. 记录数据时仪器的电压数据较为精确，实际记录数据时对小数点后几位的电压值做了四舍五入处理，造成了一定的误差。

原始数据：



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

地址: 中国 安徽 合肥市金寨路96号 邮编: 230026
电话: 0551-63602184 传真: 0551-63631760 Http://www.ustc.edu.cn

一. $R_3 = 1000 \Omega$ 时 桥路二端点 C、D 输出电压与桥臂电阻改变量的关系 ($R_3 = 999.89 \Omega$)

$R_4(\Omega)$	800	820	840	860	880	8900	920	940
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	-200	-180	-160	-140	-120	-100	-80	-60
$\delta = \frac{\Delta R}{R_0}$	0.20	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10	0.08	0.06
$U_g(mV)$	-110.92	-98.76	-86.84	-75.17	-63.75	-52.56	-41.60	-30.88

$R_4(\Omega)$	960	980	1000	1020	1040	1060	1080	1100
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	-40	-20	0	20	40	60	80	100
$\delta = \frac{\Delta R}{R_0}$	0.04	0.02	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
$U_g(mV)$	-20.36	-10.07	0.00	9.90	19.60	29.13	38.46	47.61

$R_4(\Omega)$	1120	1140	1160	1180	1200
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	120	140	160	180	200
$\delta = \frac{\Delta R}{R_0}$	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
$U_g(mV)$	56.60	65.42	74.08	82.57	90.91

(背面也有数据)

二. $R_0 = 5000 \Omega$ 时, 桥路二端点 C、D 输出电压与桥臂电阻改变量 δ 的关系
($R_3 = 4999.16 \Omega$)

$R_4(\Omega)$	4000	4100	4200	4300	4400	4500	4600	4700	4800	4900	5000
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	-1000	-900	-800	-700	-600	-500	-400	-300	-200	-100	0
$\delta = \Delta R / R_0$	-0.20	-0.18	-0.16	-0.14	-0.12	-0.10	-0.08	-0.06	-0.04	-0.02	0.00
$U_g(mV)$	-111.16	-98.95	-87.00	-75.31	-63.86	-52.66	-41.69	-30.94	-20.41	-10.10	0.00
$R_4(\Omega)$	5100	5200	5300	5400	5500	5600	5700	5800	5900	6000	
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
$\delta = \Delta R / R_0$	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	
$U_g(mV)$	9.90	19.62	29.14	38.48	47.64	56.63	65.46	74.11	82.62	90.94	99.95

三. $R_0 = 50 \Omega$ 时, 桥路二端点 C、D 输出电压与桥臂电阻改变量 δ 的关系
($R_3 = 49.92 \Omega$)

$R_4(\Omega)$	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
$\delta = \frac{\Delta R}{R_0}$	-0.20	-0.18	-0.16	-0.14	-0.12	-0.10	-0.08	-0.06	-0.04	-0.02	0.00
$U_g(mV)$	-110.67	-98.51	-86.61	-74.96	-63.56	-52.41	-41.48	-30.78	-20.30	-10.03	0.00
$R_4(\Omega)$	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$\delta = \frac{\Delta R}{R_0}$	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	
$U_g(mV)$	9.86	19.54	29.03	38.33	47.46	56.42	65.21	73.83	82.30	90.58	



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

地址: 中国 安徽 合肥市金寨路96号 邮编: 230026
电话: 0551-63602184 传真: 0551-63631760 Http://www.ustc.edu.cn

三. 利用非平衡电桥测量Cu丝的电阻随温度改变, ($R_3 = 49.92\Omega$ $U_g = -0.01\text{mV}$)

$T(^{\circ}\text{C})$	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$U_g(\text{mV})$	2.06	2.10	2.13	2.18	2.22	2.26	2.30	2.34	2.38
$T(^{\circ}\text{C})$	65	70	75	80	85				
$U_g(\text{mV})$	2.42	2.46	2.50	2.54	2.58				

$\frac{R}{R_0} = 1 + \alpha \Delta T$
12.157

1958