

简易非平衡电桥测量铜电阻温度特性

FQJ-2 型简易非平衡电桥

实

验

讲

义

杭州富阳精科仪器有限公司

(原杭州富阳电表厂)

简易非平衡电桥测量铜电阻温度特性

任何物体的电阻都与温度有关，铜电阻、热敏电阻也同样如此，给铜电阻，热敏电阻通过加热装置施加不同的温度，再通过非平衡电桥进行测量，能很明显体现出铜电阻，热敏电阻等物体的温度特性。

【实验目的】

1. 了解铜电阻、热敏电阻的温度特性及测温原理。
2. 了解非平衡电桥测温仪（铜电阻温度计）的工作原理。
3. 测量铜丝的电阻温度系数，学习用作图法和直线拟合处理数据。

【实验仪器】

FQJ-2 型简易非平衡电桥、FQJ-2 型非平衡电桥加热装置（内附铜电阻、热敏电阻），电阻箱、直流稳压电源、单臂电桥。

一、原理

当电桥在平衡状态时，A 中无电流通过，若一桥臂电阻值变化，则电桥失去平衡， $I_g \neq 0$ ， I_g 的大小与该桥臂电阻变化有关。铜电阻及热敏电阻的阻值因温度的变化而变化，用 I_g 电流的大小来表示温度的高低，这就是非平衡电桥测温度的基本原理。

图二是本实验的电路原理图，根据电桥平衡原理有：

$$I_1 R_1 + I_g R_g = I_2 R_3$$

$$(I_1 - I_g) R_2 - (I_2 + I_g) R_4 = I_g R_g$$

$$I_2 R_3 + (I_2 + I_g) R_4 = U_{AB}$$

$$R_1 = R_2$$

上述四式联立后得

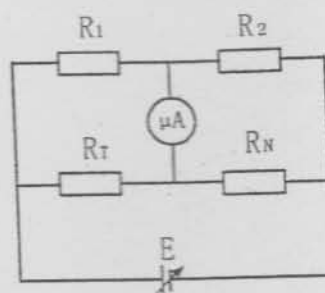
$$I_g = \frac{U_{AB} \left(1 - \frac{2R_4}{R_3 + R_4}\right)}{R_1 + 2R_g + 2 \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}}$$

I_g 随 R_4 单调变化的条件是 U_{AB} ， R_1 ， R_2 和 R_3 必须是定值。这些量值的大小取决于两个因素，一是铜电阻的温度特性；二是测温仪的上限温度（ $t_2^\circ\text{C}$ ）和下限温度（ $t_1^\circ\text{C}$ ）。

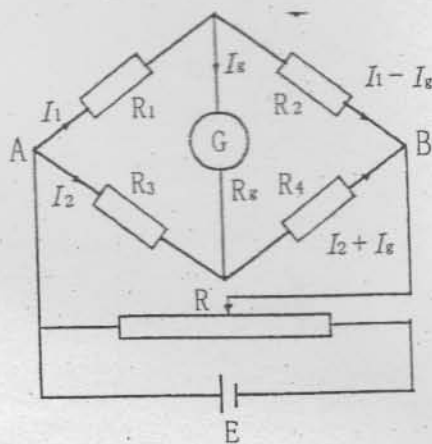
二、桥臂电阻的设计

（一） R_1 的确定

已知 $R_1 = R_2$ ，根据设计要求，当温度为 $t_2^\circ\text{C}$ 时，G 应满偏，铜电阻的阻值为 R_{N2} ，即有



图一 原理图



图二

$$R_1 = R_2$$

$$I_g = I_{gm} \quad (I_{gm} \text{ 是满偏电流值})$$

代入式图二 (1), 整理后得

$$R_1 = \frac{U_{AB}}{I_{gm}} \left(1 - \frac{2R_{t2}}{R_3 + R_{t2}} \right) - 2 \left(R_g + \frac{R_3 R_{t2}}{R_3 + R_{t2}} \right) \quad (2)$$

由于 $R_3 = R_{t1}$, 上式可写为

$$R_1 = \frac{U_{AB}}{I_{gm}} \left(1 - \frac{2R_{t2}}{R_{t1} + R_{t2}} \right) - 2 \left(R_g + \frac{R_{t1} R_{t2}}{R_{t1} + R_{t2}} \right) \quad (3)$$

可见, 微安表内阻 R_g 及测温范围 ($t_1 \sim t_2$ °C) 确定之后, R_1 值只取决于 U_{AB} 的大小。

(二) R_3 的确定

当温度为 t_1 °C, 铜电阻的阻值为 R_{t1} 时, 要求微安表指零, 此时电桥平衡。对于对称电桥 $R_1 = R_2$, $R_3 = R_{t1}$ 。所以 R_3 的电阻值应等于铜电阻在测温下限温度 (t_1 °C) 时的电阻值。

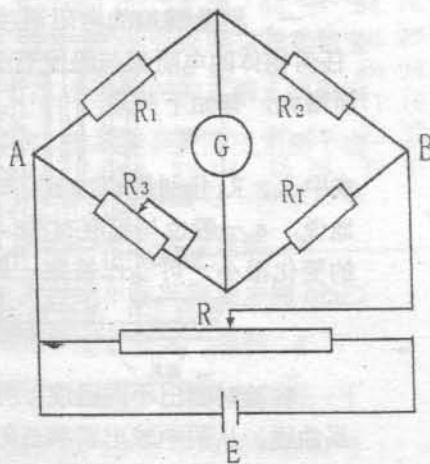
(三) U_{AB} 的确定

U_{AB} 越高, 则仪器灵敏度越高, 同时流过铜电阻的电流也越大, 则容易产生明显的自热效应, 从而造成对环境温度的影响。因此规定流经 R_T 的工作电流 I_t 不准超过定额值。本实验中 $I_t < 0.4 \text{ mA}$, 这样在 $I_g \ll I_t$ 的条件下

$$U_{AB} \leq I_{t1} (R_{t1} + R_{t2}) = 3 \text{ V} \quad (4)$$

建议 U_{AB} 取值为 2.0~2.8 V。

实验线路如图三, E 是稳压稳流电源, R 是电位器, 它与 E 组成直流分压电路, 调节电位器的 A 触点, 可得到 U_{AB} 的设计值。



图三

三、实验步骤

1. 将 " R_T " 先接入冰点模拟电阻 50Ω (因 $C \mu 50$ 铜电阻 0°C 是 50Ω 的, 用电阻箱就可), 再调节电位器 " R_N " 使电桥平衡, 即 $I_g = 0 \mu \text{ A}$ 。
2. 将温度控制仪上铜电阻的两端接入电桥桥臂 " R_T " 处。然后将温控仪调节到 100°C , 每降 10°C 记一次 $\mu \text{ A}$ 数, 直到接近于室温为止。于是铜电阻的变化引起电桥失去平衡的 $\mu \text{ A}$ 数, 即所测的温度 $^\circ \text{C}$ 数。

3. 将测量结果列入表格中, 它也可以叫做校正曲线。见图四

$I_g (\mu \text{ A})$	0	28.5	34.5	44.8	55.0	64.0	73.1	82.5	91.3	100
$T (^\circ \text{C})$	0	25.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100

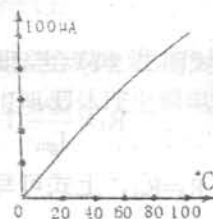
图一中, $R_1 = R_2 = 380 \Omega$, $R_T = 55 \Omega$, $R_N = 100 \Omega$ (可调), $E = 2.00 \text{ V}$ (1-30 V 可调), (稳压电源要求电压稳定度: $SV \leq 5 \times 10^{-5} / 4 \text{ h}$ 、波纹电压: $\leq 0.05 \text{ mV}$)

4. 讨论: 电桥在平衡附近可以认为是线性的, 在远离平衡区就不是线性的, 这可以简单地从并联电阻的欧姆定律来理解。

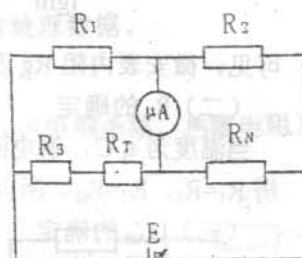
但是我们可以作出上述校正曲线。将始末两点校正以后，校正曲线必然是偏离 45° 直线的弓形（上弯或下弯）及偏差的大小，视电表的性能等而定。

如何减小偏差呢？请参见图五，设 R_T 为不变，将图一的 R_T 桥臂上串接 R_3 ，让 $R_3 \approx 5R_T$ ，将 $R_N \approx 220\Omega$ ，相应地 R_1R_2 以及将 E 也提高约 10 倍，则

在 I_g 的 μA 不变的情况下，则偏差就小 5-6 倍就几乎可以认为是 45° 的直线了。 μA 数即为，所测的温度数值（ $^\circ C$ ）。



图四 校正曲线



图五

实验：非平衡电桥测温仪的设计和应用。

一、测量铜丝的电阻温度系数

任何物体的电阻都与温度有关。多数金属的电阻随温度升高而增大，有如下关系

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t) \quad (7-4-5)$$

式中 R_t 、 R_0 分别是 $t^\circ C$ 、 $0^\circ C$ 时金属的电阻值。 α 是电阻温度系数，单位是 $(^\circ C)^{-1}$ 。严格地说， α 一般也与温度有关，但对本实验所用的纯铜材料来说，在 $-50 \sim 100^\circ C$ 的范围内 α 的变化很小，可当作常数，即 R_t 与 t 呈线性关系。于是

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t} = \frac{1}{R_0} \frac{\Delta R}{\Delta t} \quad (7-4-6)$$

实验时测出不同温度 t 所对应的电阻 R_t ，并以 R_t 为纵轴，以 t 为横轴，作 R_t-t 的关系曲线。从图中求出斜率 $\Delta R / \Delta t$ ，利用外推法，将直线延长使其与纵轴相交，交点即为 R_0 值，代入式 (7-4-6)，即可求出 α 值。也可用直线拟合法算出 α 值。

【思考题】

- (1) 非平衡电桥中的 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 的参数如何确定？
- (2) 测量之前为什么要校准？如何校准？ R_T (R_4) 的作用是什么？
- (3) 铜电阻、热敏电阻温度计与水银温度计比较有何优缺点？
- (4) 什么叫金属的电阻温度系数？如何求得？

注：简易非平衡电桥如要改变 R_1 、 R_2 、 R_N 、 R_T 电阻，可断开仪表上短路片，确定桥臂后接上电阻就可实验。

(本仪器是作为教学仪器，用校正曲线值作为温度数值，并留有思考、改进、讨论的余地。)

附录： FQJ--2 型非平衡直流电桥加热实验装置

一、概述

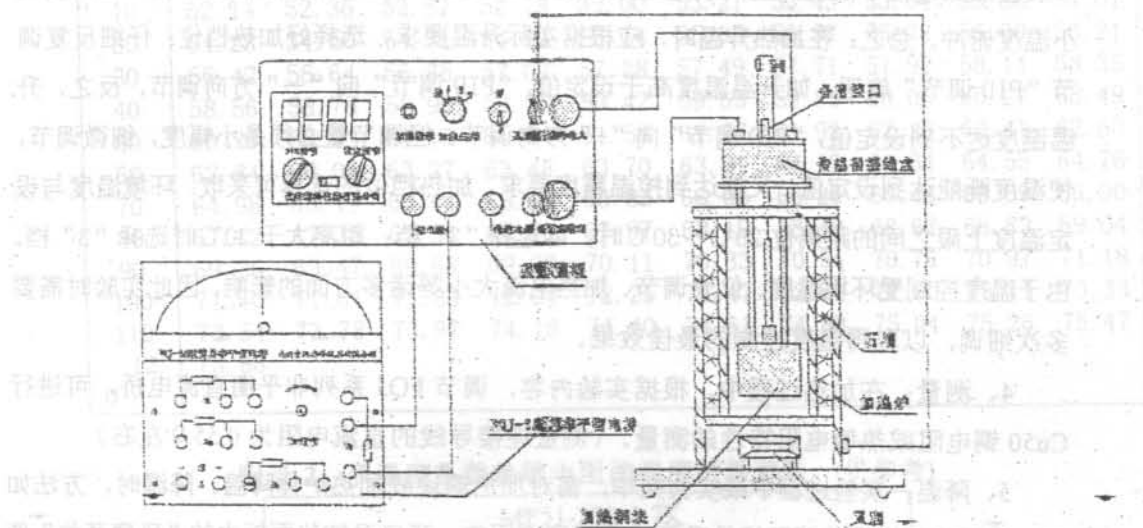
FQJ-2 型非平衡直流电桥加热实验装置，是专为 FQJ 系列非平衡直流电桥在实验过程

中配套使用的装置。该装置具有下列特点

- 1、加热温度可自由设定（不超过 120℃）
- 2、PID 控温，控温精度高
- 3、装置内配装有铜电阻，热敏电阻，增加了实验内容
- 4、加热装置电源输入为低电压，通过变压器隔离，安全可靠
- 5、装置内装有风扇，根据实验的需要，可加速降温
- 6、装置结构新颖，紧凑合理

二、结构和连接

该装置由加热炉及温度控制仪二大部分组成。其结构及连接见下图。



FQJ-2 型与加热装置连接图

三、主要技术指标

- 1、温度控制范围 0~120℃，上限为 20℃
- 2、温度控制精度 $\pm 1^\circ\text{C}$
- 3、加热输入电压 24V（隔离电压）
- 4、加热至温度上限时间 30min 左右
- 5、加热炉内有温度传感器（Cu50 电阻、MF5i-25℃-2700 Ω 负温度系数热敏电阻和备用温度插口）

四、使用说明

使用前，将温控仪机箱底部的撑架起，以便在测试时方便观察及操作。

实验开始前，应连接好温控仪与加热炉之间的导线，根据实验内容，在“铜电阻”或“热敏电阻”接线柱上与 FQJ 非平衡电桥“Rx”端相接。实验装置的加温操作步骤如下：

- 1、温度设定：根据实验温度需要，设定加热温度上限，其方法为：开启温控仪电源，显示屏显示的温度为环境温度。将“测量”设定”转换开关置于“设定”位置，转动“设

定调节”旋钮，将所需加热温度上限设定好，再将转换开关置于“测量”位置。（在温度设定时，仪器上“加热选择”开关置于“断”处）

2、PID 调节：加热前，先将“PID 调节”旋钮逆时针方向（向“-”处）旋到底，再顺时针方向旋至该整个调节行程的 1/3 左右处。

3、加热：加热前，应根据环境温度和所需升温的上限及升温速度来确定温控仪面板上“加热选择”开关的位置。该开关分为“1、2、3、”三档，由“断”位置打向任意一档，即开始加热，指示灯亮，升温的高低及速度以“1”档为最低最慢，“3”档为最高、最快，一般在加热过程中温度升至离设定上限温度 $5^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ 时，应将加热档位降低一档，以减小温度俯冲。总之：在加热升温时，应根据实际升温要求，选择好加热档位；仔细反复调节“PID 调节”旋钮，如升温温度高于设定值，“PID 调节”向“-”方向调节，反之，升温温度达不到设定值，“PID 调节”向“+”方向调节。但调节量必须是小幅度，细微调节，使温度既能达到设定值，又能达到控温精度要求。加热档位的选择可采取：环境温度与设定温度上限之间的距离位 $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 时，可选择“2”档；距离大于 30°C 时选择“3”档。由于温度控制受环境温度、仪表调节、加热电流大小等诸多方面的影响，因此实验时需要多次细调，以取得温度控制的最佳效果。

4、测量：在加热过程中，根据实验内容，调节 FQJ 系列非平衡直流电桥，可进行 Cu50 铜电阻或热敏电阻特性的测量。（测量连接导线的直流电阻为 0.55Ω 左右）

5、降温：实验过程中或实验完毕，需对加热铜块或加热炉体降温。降温时，方法如下：将加热铜块及传感器组件升至一定高度并固定，开启温控仪面板中的“风扇开关”使炉体底部的风扇转动，达到使炉体降温目的。如要加快加热铜块的降温，可断电后将加热铜块提升至加热炉体外，并浸入冷水中。

五、注意事项

1、实验开始前，所有导线，特别是加热炉与温控仪之间的信号输入线应连接可靠。

2、传热铜块与传感器组件，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，应用力轻微，以免损坏电位器。

4、装置在加热时，应注意关闭风扇电源。

5、“备用测试口”为一根一端封闭，并插入加热铜块中的空心铜管，供实验时加入介质后测试用。如在空心管中加入变压器油及铜电阻，用 QJ44 双臂电桥测试铜电阻随着温度变化时的电阻值。

6、温控仪机箱后部的电源插座中的熔丝管应选用 $1\sim 1.5\text{A}$ ，而另一黑色保险丝座中的熔丝管选用 3A 。

7、实验完毕后，应切断电源。

△: 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℃。

附录 1 铜电阻 Cu50 的电阻—温度特性 $\alpha = 0.004280/^\circ\text{C}$

温度 (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
电阻值 (Ω)										
-50	39.24									
-40	41.40	41.18	40.97	40.75	40.54	40.32	40.10	39.89	39.67	39.46
-30	43.55	43.34	43.12	42.91	42.69	42.48	42.27	42.05	41.83	41.61
-20	45.70	45.49	45.27	45.06	44.84	44.63	44.41	42.20	43.98	43.77
-10	47.85	47.64	47.42	47.21	46.99	46.78	46.56	46.35	46.13	45.92
-0	50.00	49.78	49.57	49.35	49.14	48.92	48.71	48.50	48.28	48.07
0	50.00	50.21	50.43	50.64	50.86	51.07	51.28	51.50	51.81	51.93
10	52.14	52.36	52.57	52.78	53.00	53.21	53.43	53.64	53.86	54.07
20	54.28	54.50	54.71	54.92	55.14	55.35	55.57	55.78	56.00	56.21
30	56.42	56.64	56.85	57.07	57.28	57.49	57.71	57.92	58.14	58.35
40	58.56	58.78	58.99	59.20	59.42	59.63	59.85	60.06	60.27	60.49
50	60.70	60.92	61.13	61.34	61.56	61.77	61.93	62.20	62.41	62.63
60	62.84	60.05	63.27	63.48	63.70	63.91	64.12	64.34	64.55	64.76
70	64.98	65.19	65.41	65.62	65.83	66.05	66.26	66.48	66.69	66.90
80	67.12	67.33	67.54	67.76	67.97	68.19	68.40	68.62	66.83	69.04
90	69.26	69.47	69.68	69.90	70.11	70.33	70.54	70.76	70.97	71.18
100	71.40	71.61	71.83	72.04	72.25	72.47	72.68	72.90	73.11	73.33
110	73.54	73.75	73.97	74.18	74.40	74.61	74.83	75.04	75.26	75.47
120	75.68									

附录 2: 负温度系数热敏电阻的温度特性参数 (供参考)

MF51-300-2.7K					
t (°C)	Rtck	t (°C)	Rtck	t (°C)	Rtck
0	6.77	55	1.066	110	0.279
5	5.556	60	0.928	115	0.251
10	4.590	65	0.811	120	0.226
15	3.818	70	0.712		
20	3.195	75	0.626		
25	2.700	80	0.553		
30	2.277	85	0.490		
35	1.938	90	0.436		
40	1.657	95	0.388		
45	1.424	100	0.346		
50	1.230	105	0.310		