

文章编号: 1005-8893(2005)01-0048-04

恒流源非平衡直流电桥测量非线性电阻^{*}

倪重文, 王叶荟, 是度芳

(江苏工业学院 信息科学系, 江苏 常州 213016)

摘要: 在非平衡直流电桥测量非线性电阻的基础上, 提出了恒流源非平衡直流电桥的概念, 推导了公式。与一般非平衡直流电桥相比较, 采用恒流源非平衡直流电桥测量非线性电阻, 它的测量方法比较简单, 可以进行线性化处理, 提高了测量精度。采用这一电桥对 $2.7\text{ k}\Omega$ MF11 型非线性电阻作了测量。方法是非线性电阻放在空气加热炉中并与一热容量较大的铜块紧密接触, 温控精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温控范围为室温 $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测量结果与理论结果相一致。

关键词: 非平衡直流电桥; 恒流源; 非线性电阻

中图分类号: O 41

文献标识码: A

直流电桥是一种精密的测量仪器, 具有重要的应用价值。它的基本原理是通过桥式电路来测量电阻, 从而得到引起电阻变化的其它物理量, 如温度、压力、形变等。直流电桥可分为平衡电桥和非平衡电桥。平衡电桥是通过调节电桥平衡, 把待测电阻与标准电阻进行比较直接得到待测电阻值。如惠斯登电桥、开尔文电桥均是平衡式直流电桥。由于需要调节平衡, 因此平衡电桥只能用于测量具有相对稳定状态的物理量, 也就是只能进行静态测量。实际工程和科学实验中, 物理量是连续变化的, 只能采用非平衡电桥才能测量。非平衡电桥直接测量电桥输出, 通过运算处理得到电阻值。若电桥与计算机连接, 对电桥输出进行采样并计算可立即得到结果。一般非平衡电桥都是恒压式, 它的测量值——电桥输出电压与待测量值 ΔR_x 是非线性关系, 数据处理时比较复杂。如果采用恒流源非平衡电桥, 则电桥输出电压与待测量值为线性关系, 数据处理相当简单。近来, 许多专家在数据处理方面作了很大的努力^[1~5]。

1 基本原理

非平衡电桥原理如图1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 , 即可得

到 R_x 值。

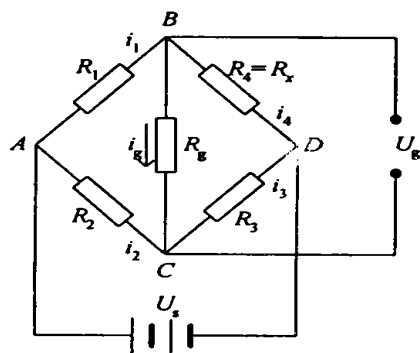


图1 非平衡电桥

Fig. 1 Unbalanced DC bridge

当负载电阻 $R_g \rightarrow \infty$, 即电桥输出处于开路状态时, $i_g = 0$, 仅有电压输出并用 U_o 表示, 如接入数字电压表或高输入阻抗放大器时即属此种情况。

根据分压原理, 可得:

$$U_{BC} = \frac{R_4}{R_1 + R_4} \cdot U_s \quad (1)$$

$$U_{DC} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_s \quad (2)$$

输出电压 U_o 为 U_{BC} 与 U_{DC} 之差

* 收稿日期: 2004-12-08

作者简介: 倪重文(1964-), 男, 江苏武进人, 实验师。

$$U_o = U_{BC} - U_{DC} = \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} U_s \quad (3)$$

当满足条件

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (4)$$

则电桥输出 $U_o = 0$, 即电桥处于平衡状态, (4) 式就称为电桥平衡条件。为了进行准确的测量, 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的电阻变化有关。

若 R_1 、 R_2 、 R_3 固定, R_4 为温度函数, $R_4 = R(t) = R_x$, 则当温度从 $t_0 \rightarrow t_0 + \Delta t$ 时, $R_4 \rightarrow R_4 + \Delta R$, 因电桥不平衡而产生的电压输出为^[6]

$$U_o(t) = \frac{R_2 R_4 + R_2 \Delta R - R_1 R_3}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3) + \Delta R(R_2 + R_3)} \cdot U_s \quad (5)$$

若电阻变化很小, 即 $\Delta R \leq R_i$ ($i=1, 2, 3, 4$), 则 (5) 式分母中含有 $\Delta R(R_2 + R_3)$ 项可以略去, 并考虑到 (4) 式, (5) 式变为

$$U_o(t) = \frac{R_2 \cdot \Delta R}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} \cdot U_s \quad (6)$$

由此可得 3 种桥式的输出为

(1) 等臂电桥 ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$):

$$U_o(t) = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (7)$$

(2) 卧式电桥 ($R_1 = R_4 = R$, $R_2 = R_3 = R'$, 且 $R \neq R'$):

$$U_o(t) = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (8)$$

(3) 立式电桥 ($R_1 = R_2 = R'$, $R_3 = R_4 = R$, 且 $R' \neq R$):

$$U_o(t) = \frac{RR'}{(R+R')^2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot U_s \quad (9)$$

十分清楚, 当 $\Delta R \leq R_i$ 时, 3 种电桥的输出均与 $\Delta R/R$ 成线性比例关系。特别要强调的一点是公式 (6) ~ (9) 中的 R 和 R' , 均为预调平衡后的电阻值。

测量得到电压输出后, 通过上述公式运算得到 $\Delta R(t)/R$ 或 $\Delta R(t)$, 从而求得 $R(t) = R + \Delta R(t)$ 。等臂电桥、卧式电桥的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。

在上述公式中, 对电阻的变化率限定在较小范围, 即设定条件 $\Delta R \leq R_i$ 成立, 所以, 电压输出

与 $\Delta R_x/R$ 成正比。但是在相当多的情况, $\Delta R \leq R_i$ 条件不能成立, 尤其是非线性电阻, 其变化率往往相当大, 例如 $2.7 \text{ k}\Omega \text{ MF11}$, 温度从 25°C 变化到 65°C 时, 电阻从 2700Ω 变化到 748Ω , 其变化率达到 72% 以上, $\Delta R \leq R_i$ 的条件是绝对不成立的。对于这样一类电阻的测量, 上述的公式均不能使用, 必须重新推导一些非线性公式。若公式 (5) 分母中的 $\Delta(R_2 + R_3)$ 项不能略去, 则各种桥式电路的电压输出公式可作简化

(1) 等臂电桥: (5) 式变为

$$U_o(t) = \frac{R \cdot \Delta R}{4R^2 + 2R \cdot \Delta R} \cdot U_s = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}} \quad (10)$$

(2) 卧式电桥: (5) 式变为

$$U_o(t) = \frac{R' \cdot \Delta R}{4RR' + 2R' \cdot \Delta R} \cdot U_s = \frac{U_s}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}} \quad (11)$$

(3) 立式电桥: (5) 式变为

$$U_o(t) = \frac{R' \cdot \Delta R}{(R+R')^2 + (R+R') \cdot \Delta R} \cdot U_s = \frac{RR'}{(R+R')^2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}} \quad (12)$$

可知在恒压源情况下, ΔR 与输出电压 U_o 不是线性关系, 数据处理复杂。

2 恒流源非平衡直流电桥

图 2 为恒流源非平衡直流电桥^[7,8], 所谓恒流

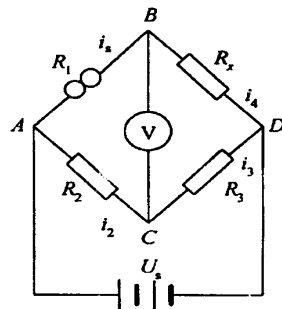


图 2 恒流源非平衡电桥

Fig. 2 Unbalanced DC bridge using constant current

源非平衡电桥是指将图 1 中的电阻 R_1 换成了恒流源 i_s , 当电阻 R_x 变化时, 电流 i_s 保持恒定, 则 $V_{BC} = i_s R_x$ 。对于高阻电压表 (如数字电压表), 内阻 $R_0 \rightarrow \infty$, $i_0 = 0$, 则 $U_{DC} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_s$ 。若

R_2 、 R_3 恒定, 则 U_{DC} 为常数。电桥输出电压 U_o 为:

$$U_o = (U_{BC} - U_{DC}) = (i_s R_x - U_{DC}) \quad (13)$$

由 (13) 式可知, 输出电压 U_o 与待测电阻 R_x 成线性关系。如果 R_x 是热敏电阻, 设温度 $t = t_0$ 时, $R_x = R_{x0}$; $t = t_0 + \Delta t$ 时, $R_x = R_{x0} + \Delta R_x$ 。为了测量方便, 在 t_0 时预调平衡, 即调节 R_3 , 使 $U_o = 0$, 则由 (13) 得

$$U_{DC} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_s = R_{x0} i_s \quad (14)$$

温度 t 时输出电压 U_o 为:

$$U_o = [i_s (R_{x0} + \Delta R_x) - U_{DC}] = \Delta R_x i_s \quad (15)$$

由 (14) 式得 R_{x0} , 由 (15) 式得 ΔR_x , 温度 t 时电阻 $R_x = R_{x0} + \Delta R_x$ 。用恒流源非平衡电桥测电阻时, 输出电压 U_o 与电阻变化 ΔR_x 成正比。数据处理相当简单。

图 3 是集成电路中常用的一种恒流源, T_1 、 T_2 、 T_3 是 3 只型号相同的 PNP 三极管, 电源电压为 U_{cc} , 输出电流为 i_s , 由电子技术知识可知, $i_s \approx i_{e3} = U_{be}/R_s$, U_{be} 为三极管发射极电压, 对于 S_i 管, $U_{be} = 0.6 \sim 0.7$ V, 因此只要电阻 R_s 恒定, 外接负载电阻在一定范围变化时, i_s 保持恒定。调节 R_s , 可以改变恒流 i_s 大小。实验表明, 在图示电阻参数下, T_1 、 T_2 、 T_3 选 5401 三极管, 调节 R_s 为 $1.3 \text{ k}\Omega$ 时, $i_s = 0.5 \text{ mA}$, 外接负载电阻在 $0 \sim 8.1 \text{ k}\Omega$ 范围变化时, i_s 保持不变。

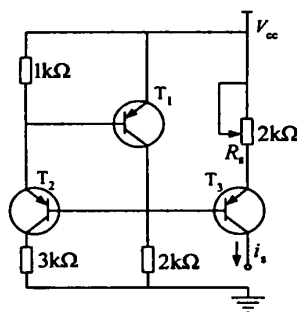


图 3 恒流源

Fig. 3 Constant current

3 测量与结果

2.7 kΩMF11 型半导体热敏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 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:

$$R_t = R_0 e^{B_n/T} \quad (16)$$

式中, R_0 、 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; 可以将 (16) 式改写为:

$$\ln R_t = \ln R_0 + B_n/T \quad (17)$$

表 1 2.7 kΩMF11 电阻—温度特性

Table 1 Resistance—temperature speciality

$t/^\circ\text{C}$	25	30	35	40	45	50	55	60	65
R/Ω	2 700	2 225	1 870	1 573	1 341	1 160	1 000	868	748

测量时将 2.7 kΩMF11 电阻接入图 2 中的 R_x 处, 这一电阻放入空气加热炉中并与加热炉中的铜块紧密接触。铜块的直径 $\phi 35 \text{ mm}$, 厚 10 mm, 其热容量大, 以保证温度波动小。空气加热炉连接温度控制器, 温控精度为 0.1°C , 温控范围为室温 $\sim 100^\circ\text{C}$ 。每 5°C 测量 1 个点。测量结果见图 4, 由图可知: 线性关系非常明显, 测量结果与理论结果一致。

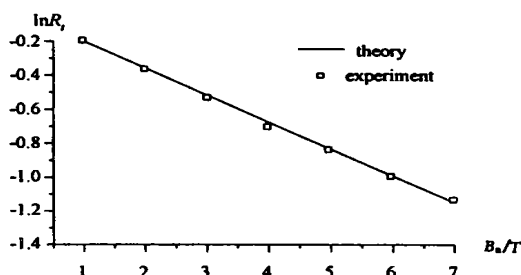


图 4 $\ln R_t - B_n/T$ 曲线

Fig. 4 $\ln R_t - B_n/T$ curve

4 结 论

直流平衡电桥只能对电阻进行静态测量, 对于随环境变化的电阻只有采用非平衡电桥才能对其进行动态测量。而采用恒压源非平衡直流电桥由于电桥输出电压与电阻变化 ΔR_x 是非线性关系, 数据处理复杂。本文提出的恒流源非平衡直流电桥有一

个非常好的特点: 输出电压与电阻变化 ΔR_x 成线性关系。因此, 数据处理可用 (17) 式表示, 相当简单, 测量结果与理论值一致。这种恒流源非平衡电桥具有非常广泛的应用价值。

参考文献:

- [1] 江兴方. 声速测量实验中的三点思考 [J]. 大学物理, 2002, 21 (12): 28—30.
- [2] 江兴方. 一个静电场问题的数值计算 [J]. 江苏工业学院学报, 2003, 15 (2): 53—56.
- [3] 许雪芬, 巢毅敏. 倒摆运动稳定性的相空间动力学分析 [J]. 江苏石油化工学院学报, 1999, 11 (1): 43—45.
- [4] 江兴方. 正确确定遏止电压, 测量普朗克常数 [J]. 江苏石油化工学院学报, 1999, 11 (1): 53—55.
- [5] 曹建庆, 江兴方. 相位比较法在声速测量中的应用 [J]. 江苏石油化工学院学报, 2001, 13 (4): 62—64.
- [6] 是度芳, 贺渝龙. 基础物理实验 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2003.
- [7] 杨素行. 模拟电子技术基础简明教程 [M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [8] 张华鹏. STD 在电阻炉温度控制系统中的应用 [J]. 江苏石油化工学院学报, 2001, 13 (3): 50—52.

Measurement of Nonlinear Resistance by Unbalanced DC Bridge Using Constant Current

NI Zhong—wen, WANG Ye—hui, SHI Du—fang

(Department of Information Science, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

Abstract: On the basis of measurement of nonlinear resistance with an unbalanced DC bridge, the concept of unbalanced DC bridge with a constant current battery was proposed and the relevant formula of measuring nonlinear resistance was deduced. In comparison with the conventional unbalanced DC bridge, the method of measurement was quite simple by using the unbalanced DC bridge with a constant current battery. Furthermore linear processing could be made, and the precision of measurement could be increased. To measure resistance: (model 2.7 k Ω MF11). The nonlinear resistance was placed in an air—heating stove and in close contact with a copper bulk of larger heat capacity. The precision of temperature—controlling was 0.1 °C, and the range of temperature controlling was from room temperature to 100 °C. The measurement result was in accordance with the theory.

Key words: unbalanced DC bridge; constant current; nonlinear resistance