

文章编号: 1000-5471(2008)04-0149-04

惠斯通电桥灵敏度的探究

谭兴文^{1,2}, 韩力¹

1. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400100; 2. 西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715

摘要: 从理论推导出了影响起灵敏度的因素, 并且分析了惠斯通电桥灵敏度与电阻的搭配、桥臂阻值的选择之间的关系, 将对提高电桥灵敏度及该实验教学起指导作用。

关键词: 惠斯登电桥; 灵敏度; 比例臂; 电阻

中图分类号: G642.423

文献标识码: A

惠斯通电桥是一种用比较法测电阻的精密仪器, 可测电阻范围为几十到几十万欧姆。惠斯通电桥是英国科学家惠斯通首次使用来测量电阻的, 就被称为惠斯通电桥。惠斯通电桥的线路原理如图 1 所示。电桥平衡时, $R_x = \frac{R_1}{R_4} R_3$, 若 $R_3, R_1/R_4$ 的值已知, 则可以根据上式计算出 R_x 。这个公式仅在电桥平衡时才成立的,

而电桥的平衡是依据检流计的指针是否为零来判断的, 由于判断时受到眼睛分辨能力的限制而存在差异, 会给测量结果带来误差, 影响测量的准确性。这个影响的大小取决于电桥的灵敏度。惠斯通电桥在科学测量技术中应用广泛, 随着科学技术的发展, 对测量精度的要求越来越高, 而惠斯通电桥灵敏度的高低关系到测量结果的精确度问题, 影响惠斯通电桥灵敏度的因素有哪些, 它们是如何影响灵敏度的。近年来, 许多作者对这些问题进行了一些定性的探讨, 没有定量化研究和从理论上进行解释。本文从定量的角度对惠斯通电桥的灵敏度进行了探讨, 并从理论上进行了分析和解释, 目的是为了能够更好地提高电桥的测量精度。

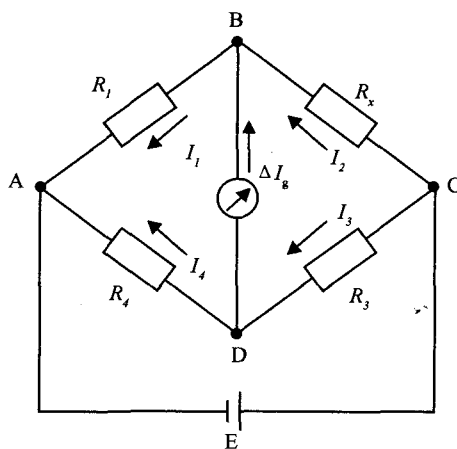


图 1 惠斯通电桥

1 电桥灵敏度的定义

所谓电桥灵敏度, 就是在已经平衡的电桥里, 当调节比较臂电阻 R_3 , 使之改变一个微小量 ΔR_3 , 这时检流计指针离开平衡位置 $\Delta\alpha$ 分度, 则定义电桥灵敏度 S 为

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\frac{\Delta R_3}{R_3}} \quad (1)$$

由检流计电流灵敏度的定义有

$$\Delta\alpha = s_i \Delta I_g \quad (2)$$

式中: s_i 为所用检流计的电流灵敏度; ΔI_g 是当调节臂变化一个微量 ΔR_3 , 检流计微小偏转 $\Delta\alpha$ 时相对应的检流计支路不平衡电流。

收稿日期: 2007-07-25

作者简介: 谭兴文(1972-), 男, 重庆人, 讲师, 硕士研究生, 主要从事物理实验教学。

通讯作者: 韩力, 副教授。

把(2)式代入(1)式,得到电桥灵敏度的另一表达式:

$$S = s_i \frac{\Delta I_g}{\frac{\Delta R_3}{R_3}} \quad (3)$$

如图 1,运用线路电压定律和节点电流定律,则有

$$\text{在 ABDA 回路中} \quad I_1 R_1 + \Delta I_g R_g - I_4 R_4 = 0 \quad (4)$$

$$\text{在 BCDB 回路中} \quad I_2 R_x - I_3 R_3 - \Delta I_g R_g = 0 \quad (5)$$

$$\text{在 ABCEA 回路中} \quad I_1 R_1 + I_2 R_x = E \quad (6)$$

$$I_2 = I_1 - \Delta I_g \quad (7)$$

$$I_3 = I_4 + \Delta I_g \quad (8)$$

整理得到线性方程组

$$I_1 R_1 + \Delta I_g R_g - I_4 R_4 = 0 \quad (9)$$

$$I_1 R_x - (R_x + R_3 + R_g) \Delta I_g - I_4 R_3 = 0 \quad (10)$$

$$I_1 (R_1 + R_x) - \Delta I_g R_x = E \quad (11)$$

当给 R_3 一个微小增量,变成 $(R_3 + \Delta R_3)$,联立(9)、(10)、(11)式解得

$$\Delta I_g = \frac{R_1 \Delta R_3 E}{R_1 R_x (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_x) + R_g (R_1 + R_x) (R_3 + R_4)} \quad (12)$$

将(12)式代入(3)式,则电桥的灵敏度

$$S = \frac{S_i E}{R_1 + R_4 + R_3 + R_x + R_g \left(2 + \frac{R_x}{R_1} + \frac{R_4}{R_3}\right)} \quad (13)$$

(13)式表明,电桥的灵敏度与电源电压成正比,与检流计内阻有关,与桥臂总阻值、桥臂电阻之比有关。

2 限定条件怎样选取各桥臂的阻值,使电桥灵敏度 S 为最大

由图 1 知,电桥平衡时有

$$R_x = \frac{R_1}{R_4} R_3 = C R_3 \quad (C = \frac{R_1}{R_4} \text{ 为比例臂系数})$$

如设 C 为一常量,则 R_4 (或 R_1) 可取不同的阻值,但只要 R_1 一定,必有 $R_4 = R_1 / C$,将 R_1 作为变量,则(13)式可写成

$$S = \frac{S_i E}{\left(1 + \frac{1}{C}\right) R_1 + \left(\frac{1}{C} + 1\right) R_x + R_g \left(2 + \frac{R_x}{R_1} + \frac{R_1}{R_x}\right)} \quad (14)$$

要使 S 最大,应同时满足: $\frac{\partial S}{\partial R_1} = 0$ $\frac{\partial S}{\partial R_x} = 0$

经整理可得:

$$R_1 = \frac{1}{2} R_x \quad R_g = \frac{1}{3} \left(1 + \frac{1}{C}\right) R_x \quad (15)$$

从上式可以看出,当被测电阻 R_x 一定时,选择比例臂 R_1 的阻值为 $R_x/2$ 时,电桥灵敏度具有最大值,如 $R_x = 50 \Omega$, $C = 2$, $R_g = 27 \Omega$, $E = 5 \text{ V}$,检流计的灵敏度 $S_i = 70143 \times 10^{-5} (\text{div}/\text{A})$,则电桥的灵敏度与 R_1 的关系见图 2;检流计的选择应根据比例系数 C 及待测电阻而定,如检流计内阻 R_g 满足(15)式时,电桥具有最大 S 值,这就说明了为什么用同一电桥测不同阻值的电阻,电桥灵敏度不同的原因.如实验室条件许可,也可适当的选择不同内阻 R_g 的检流计和比例系数 C 值,既可使 S 值较大,又可保证检流计工作在临界状态。

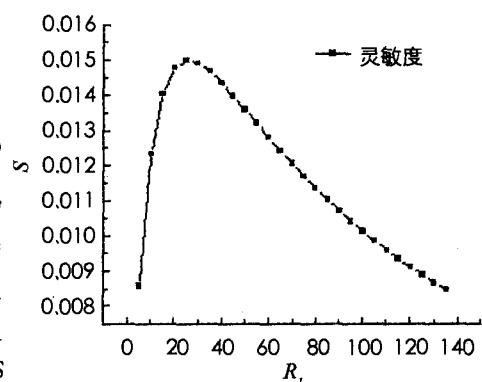


图 2 电桥灵敏度与 R_1 的关系

3 电阻搭配对测量灵敏度的影响

4 个电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 , 按图 3 所示方法连接. 由电桥平衡条件 $R_2R_3 = R_1R_4$ 可知, 2 种接法检流计中 都无电流通过. 但这 2 种电阻搭配, 测量的灵敏度是不同的. 如设定电桥 4 个电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 中, R_1, R_2 较大, R_3, R_4 较小.

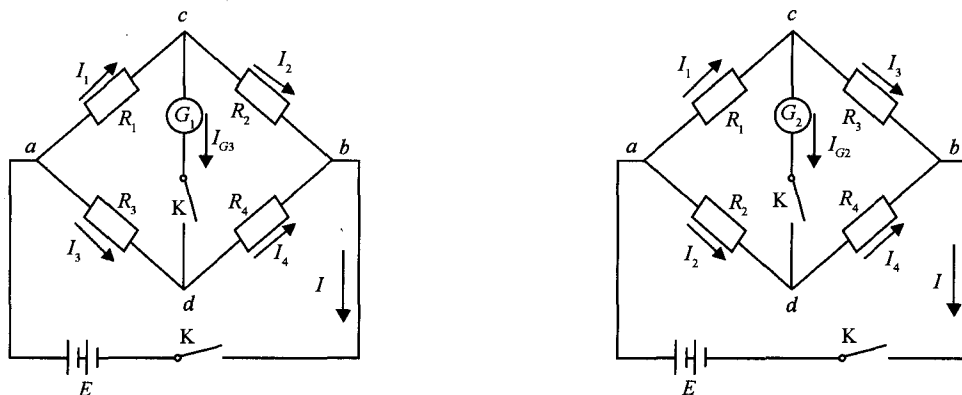


图 3 惠斯通电桥两种不同的连接图

对图 3(a), 设检流计的内阻为 R_g , 根据基尔霍夫定律, 列出如下方程

对节点 a $I_1 + I_3 - I = 0$ (16)

对节点 b $I_2 + I_4 - I = 0$ (17)

对节点 c $-I_1 + I_2 + I_{G1} = 0$ (18)

回路 acda $R_1 I_1 + R_g I_{G1} - R_3 I_3 = 0$ (19)

回路 cbdc $R_2 I_2 - R_4 I_4 - R_g I_{G1} = 0$ (20)

回路 adba $R_3 I_3 + R_4 I_4 - E = 0$ (21)

联立解以上方程组得

$$I_{G1} = \frac{(R_2 R_3 - R_1 R_4) E}{R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2) + R_g (R_1 + R_2) (R_3 + R_4)} \quad (22)$$

当 $R_2 R_3 = R_1 R_4$ 时, $I_{G1} = 0$, 电桥平衡. 假设电桥平衡后, 电阻 R_4 有一个微小增量 ΔR_4 , 这时检流计中有一个微小电流变化, 其值为

$$\Delta I_{G1} = \frac{[R_2 R_3 - R_1 (R_4 + \Delta R_4)] E}{R_1 R_2 (R_3 + R_4 + \Delta R_4) + R_3 (R_4 + \Delta R_4) (R_1 + R_2) + R_g (R_1 + R_2) (R_3 + R_4 + \Delta R_4)} \quad (23)$$

由于 $R_2 R_3 = R_1 R_4$, 所以有

$$\Delta I_{G1} = \frac{-ER_1 \Delta R_4}{R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2) + R_g (R_1 + R_2) (R_3 + R_4) + \Delta R_4 [R_1 R_2 + R_3 (R_1 + R_2) + R_g (R_1 + R_2)]} \quad (24)$$

对图 3(b), 同理可得

$$I_{G2} = \frac{(R_2 R_3 - R_1 R_4) E}{R_1 R_3 (R_2 + R_4) + R_2 R_4 (R_1 + R_3) + R_g (R_1 + R_3) (R_2 + R_4)} \quad (25)$$

假设电桥平衡后, 电阻 R_4 有一个同样微小增量 ΔR_4 , 引起检流计中的电流微小变化, 其值为 ΔI_{G2} .

由于 $R_2 R_3 = R_1 R_4$, 故有

$$\Delta I_{G2} = \frac{-R_1 \Delta R_4 E}{R_1 R_3 (R_2 + R_4) + R_2 R_4 (R_1 + R_3) + R_g (R_1 + R_3) (R_2 + R_4) + \Delta R_4 [R_1 R_3 + R_2 (R_1 + R_3) + R_g (R_1 + R_3)]} \quad (26)$$

令 P 等于(26)式的分母, Q 等于(24)式分母, 有

$$P - Q = R_g (R_2 - R_3) (R_1 - R_4) \quad (27)$$

R_g (检流计内电阻) 为正, 由于在开始已设 $R_1 R_2$ 为较大电阻, 故 $(R_2 - R_3)$ 、 $(R_1 - R_4)$ 均为正, 因而 $P - Q > 0$, 也就是说, (26)式分母大于(24)式分母, 即在相同增量 ΔR_4 情况下, 检流计中电流变化 $|\Delta I_{G1}|$ 大于 $|\Delta I_{G2}|$. 从而证明了两个较大电阻放在电源对角线的一边, 两个较小的电阻放在电源对角线的另一边时

比两个较大电阻放在桥的一边,两个较小的电阻放在桥的另一边时的灵敏度要高,即 $s_1 > s_2$. 取 $R_2 = 50 \Omega$, $R_g = 27 \Omega$, $\Delta R_4 = 0.2 \Omega$, $E = 5 V$, 检流计的灵敏度 $S_i = 70143 \times 10^{-5} (div/A)$, $R_1 = 50 \Omega$, 则 $S_1 S_2$ 如图 4 所示.

4 结 论

(1) 惠斯通电桥的灵敏度与电源电压成正比,与所用检流计的灵敏度 S_i 成正比,与检流计内阻有关、桥臂总阻值、桥臂电阻之比有关.

(2) 当被测电阻 R_x 一定时,比例臂的阻值为 $R_x/2$ 时,惠斯通电桥的灵敏度具有最大值.

(3) 当电桥由 2 个较大电阻和两个较小电阻组成时,2 个较大电阻放在电源对角线的一边,2 个较小的电阻放在电源对角线的另一边时比 2 个较大电阻放在桥的一边,2 个较小的电阻放在桥的另一边时的灵敏度要高.

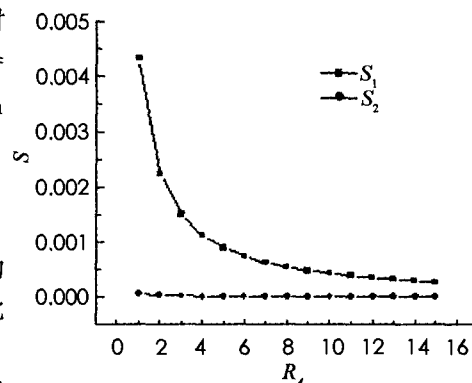


图 4 电阻搭配对灵敏度的影响

参考文献:

- [1] 沈元华, 陆申龙. 基础物理实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 165-168.
- [2] 崔益和. 浅析自组惠斯登电桥的灵敏度 [J]. 仪器仪表与分析监测, 2001(4): 20-21.
- [3] 李丽霞, 张秀. 惠斯通电桥灵敏度的探讨 [J]. 孝感学院学报, 2004(6): 66-68.
- [4] 罗守信. 电工学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 23-32.
- [5] 朱鹤年. 物理实验研究 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1994, 151-163.
- [6] 杨述武. 普通物理实验(电磁学部分) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001, 67-70.
- [7] 秦艳芬. 惠斯通电桥灵敏度与桥臂阻值关系的分析 [J]. 宁波高等专科学校学报, 2004(4): 8-10.
- [8] 祁金刚, 郭锦泉. 惠斯通电桥测电阻实验探索 [J]. 长春师范高等专科学校学报, 2004(5): 21-22.
- [9] 孙丙西, 张晓燕. 惠斯通电桥的灵敏度 [J]. 内蒙古民族大学学报, 2003(8): 369-370.
- [10] 赵福海. 桥臂电阻对惠斯通电桥灵敏度的影响 [J]. 绵阳师范高等专科学校学报, 1999(10): 30-33.

The Research on Sensitivity of Wheatstone Electric Bridge

TAN Xing-wen^{1,2}, HAN Li¹

1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400100, China;

2. School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing, 400715, China

Abstract: Wheatstone electric bridge is a precision instrument measured the resistance with the comparison test. Delicate degree of wheastone bridge is an important factor that effects its measurement precision. Along with the technical development, the sensitivity of Wheatstone electric bridge is requested to be more and more high. This article obtained the factors influencing the sensitivity of Wheatstone electric bridge from the aspect of theory, and discussed the relationship between sensitivity of bridge and resistance of arm of bridge and innerresistance of galvanometer. And this can enhance the surveying sensitivity. and benefit the improvement of delicate degree and the teaching of the experiment.

Key words: Whenatstone electric bridge; sensitivity; proportional arms; resistance